

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

Aplikační oblasti PVD povlaků u řezných nástrojů
ze slinutého karbidu

Application Area of PVD Coatings by Cutting Tools From
Cemented Carbide

Student:

Vojtěch Sléha

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Dr. Ing. Ivan Mrkvica

Ostrava 2013

Zadání bakalářské práce

Student:

Vojtěch Sléha

Studijní program:

B2341 Strojírenství

Studijní obor:

2303R002 Strojírenská technologie

Téma:

Aplikační oblasti PVD povlaků u řezných nástrojů ze slinutého karbidu
Application Area of PVD Coatings by Cutting Tools From Cemented Carbide

Zásady pro vypracování:

1. Princip povlakování a typy PVD povlaků.
2. Základní vlastnosti jednotlivých povlaků.
3. Vliv různého typu povlaku na opotřebení VBD ze slinutého karbidu.
4. Aplikační oblasti pro jednotlivé PVD povlaky.

Seznam doporučené odborné literatury:

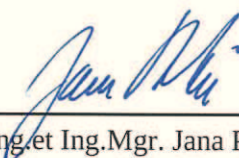
- [1] HUMÁR, A. *Materiály pro řezné nástroje*. 1. vydání, Praha: MM publishing, s.r.o., 2008, 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
- [2] VRSTVY A POVLAKY. Zborník prednášok, Trenčín: Miloš Vavřík-Knihviazačstvo, 2011, 212 s. ISBN 978-80-970824-0-6.
- [3] ERKENS, G.; CRUMMENAUER, J.; NORIN, A.; VETTER, J. *Trends in der PVD-Beschichtung*. Werkstatt und Betrieb, 1-2/2012, s. 32-35. ISSN 0043-2792.
- [4] ZEMAN, P.; ZINDULKA, O.; SKRBK, J. *Metodika řezných zkoušek pro posouzení účinku ochranného povlaku řezných nástrojů*. Jemná mechanika a optika, 7-8/2010, s. 205-208. ISSN 0447-6441.
- [5] NORMY, PROSPEKTY, KATALOGY.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **doc. Dr.Ing. Ivan Mrkvica**

Datum zadání: 14.12.2012

Datum odevzdání: 20.05.2013


Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.
vedoucí katedry




doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 16.5.2013

..... V. Lelka

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́домі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 16.5.2013

.....
V. Sléha

podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Vojtěch Sléha

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Školní 367, 788 13 Víkřřovice

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

SLÉHA, V. *Aplikační oblasti PVD povlaků u řezných nástrojů ze slinutého karbidu : bakalářská práce*. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2013, 52 s. Vedoucí práce: Mrkvica, I.

Bakalářská práce hodnotí a porovnává PVD povlaky firmy Pramet Tools, s.r.o. sídlící v Šumperku. Rešeršní část seznamuje s principem technologie PVD povlakování a podrobněji popisuje metodu obloukového odpařování použitou při výrobě testovaných povlaků. Dále se zabývá materiály a typy povlaků, jejich vlastnostmi, možnými aplikacemi a nakonec popisuje použité experimentální metody při zkoušení povlaků. V experimentální části jsou popsány postupy měření či zkoušení a uvedeny jejich výsledky. V závěru bakalářské práce jsou poté získané výsledky zkoušek zhodnoceny podle získaných informací.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

SLEHA, V. *Application Area of PVD Coatings by Cutting Tools From Cemented Carbide : Bachelor Thesis*. Ostrava : VSB – Technical university of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Working and Assembly, 2013, 52 p. Thesis head: Mrkvica, I.

The bachelor thesis evaluates and compares PVD coatings produced by company Pramet Tools, s.r.o. based in Šumperk. The theoretical part of the thesis informs about principle of PVD coating technology and describes the arc evaporation method used for coating in greater detail. It also deals with coating materials and types, its properties, possible applications and finally principles of the experimental methods used for coatings testing are explained. In the experimental part of the thesis the measuring or testing procedures are described and its results are listed. In the thesis conclusion the testing results are evaluated on the basis of obtained information.

Obsah

Seznam použitých značek a symbolů.....	8
Úvod – cíl bakalářské práce.....	9
1 Princip PVD povlakování.....	10
1.1 Naprašování.....	11
1.2 Napařování.....	11
1.2.1 Obloukové odpařování.....	12
1.3 Čištění a úprava nástrojů před povlakováním.....	15
2 Typy PVD povlaků.....	16
2.1 Materiály, jejich vlastnosti a aplikace.....	16
2.1.1 TiN.....	16
2.1.2 TiC.....	16
2.1.3 Materiály na bázi Al_2O_3	16
2.1.4 TiCN.....	17
2.1.5 TiAlN-ALTiN.....	17
2.1.6 TiAlSiN.....	18
2.1.7 CrN.....	18
2.1.8 ZrN.....	19
2.2 Vliv přítomnosti prvků na vlastnosti.....	19
2.3 Vliv struktury a tloušťky vrstev na vlastnosti povlaků.....	19
2.3.1 Vývojové stupně povlakovaných slinutých karbidů.....	19
2.3.2 Druhy vrstev.....	20
2.3.3 Tloušťka vrstev.....	23
3 Metody charakterizace vlastností a zkoušení povlaků.....	24
3.1 Světelná mikroskopie.....	24
3.2 Skenovací elektronová mikroskopie.....	25
3.3 Měření tvrdosti podle Vickerse.....	26
3.4 Vrypová zkouška – scratch test.....	27
3.5 Opotřebení, trvanlivost a řezivost nástroje.....	28
3.6 Teplotní trhliny.....	29
4 Experimentální část.....	30
4.1 Charakterizace substrátu SK, povlaků, VBD a nástrojů.....	30
4.2 Měření tloušťky.....	31
4.2.1 Výbrus vyměnitelných břitových destiček.....	31

4.2.2	Popis měření	31
4.2.3	Výsledky měření	32
4.3	Analýza chemického složení	34
4.3.1	Popis analýzy	34
4.3.2	Výsledky analýzy	34
4.4	Měření tvrdosti podle Vickerse	35
4.4.1	Popis měření	35
4.4.2	Výsledky měření	36
4.5	Adheze	36
4.5.1	Popis zkoušky	36
4.5.2	Výsledky zkoušky	37
4.6	Zkouška šíření teplotních trhlin	38
4.6.1	Řezné podmínky	38
4.6.2	Snímky teplotních trhlin	39
4.7	Dlouhodobá zkouška trvanlivosti	41
4.7.1	Podmínky zkoušky	41
4.7.2	Naměřené hodnoty opotřebení	41
4.7.3	Trvanlivost a řezivost	44
5	Závěr	46
6	Seznam použité literatury	49

Seznam použitých značek a symbolů

BSE	Back-scattered Electrons (odražené elektrony)
CVD	Chemical Vapour Deposition (chemické napařování z plynné fáze)
EDS/EDX	Energy-dispersive X-ray spectroscopy (energieově-disperzní spektroskopie)
PVD	Physical Vapour Deposition (fyzikální napařování)
SEM	skenovací elektronový mikroskop
SE	Secondary electrons (sekundární elektrony)
SK	slinutý karbid
VBD	vyměnitelná břitová destička
WC	wolfram carbide (karbid wolframu)

Úvod – cíl bakalářské práce

Oblast obrábění se stejně jako ostatní oblasti strojírenského průmyslu rychle rozvíjí. Zdokonalování či vyvíjení nových nástrojových materiálů je jednou z cest ke zvýšení produktivity výroby, která souvisí také s opotřebením nástrojů. Delší trvanlivost a životnost nástrojů například zkracuje časy prostojů v důsledku jejich výměny či snižuje náklady na nástroje. Delší trvanlivosti lze docílit právě ochranou nástroje aplikováním povlaků z velmi tvrdých a odolných materiálů.

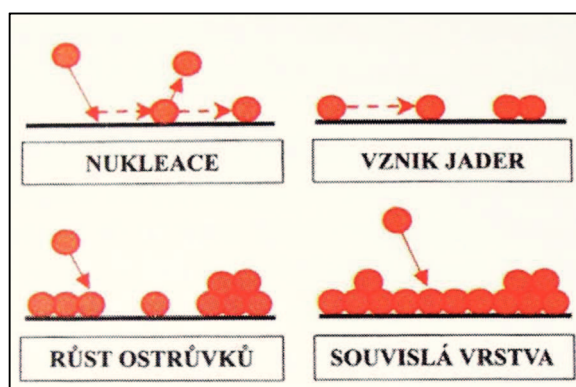
Počátek povlakování slinutých karbidů patří mezi významné milníky ve vývoji materiálů pro řezné nástroje. Povlakované SK umožnily oproti nepovlakovaným podstatné zvýšení řezných parametrů a také prodloužení jejich životnosti. Od začátku 80. let 20. století, kdy byl povlak z TiN vytvořený technologií PVD použit pro první řeznou aplikaci, bylo vyvinuto a vylepšeno mnoho druhů povlaků vhodných pro různé řezné aplikace. Ty se od sebe liší například chemickým složením, strukturou vrstev nebo technologií výroby. Stejně tak byla vyvíjena nová povlakovací zařízení umožňující vytvořit nejmodernější typy povlaků, jako jsou nanokompozitní či nanovrstevné (supermřížkové).

Bakalářská práce má za cíl charakterizaci vlastností a porovnání tří odlišných druhů povlaků firmy Pramet Tools, s.r.o nanesených technologií odpařování nízkonapětovým obloukem na stejném podkladovém substrátu ze slinutého karbidu. Vzorky byly napovlakovány firmou SHM, s.r.o v rámci standardní výroby na povlakovacím zařízení $\pi 300$. Jednotlivé povlaky se liší svou strukturou a chemickým složením. Porovnány jsou na základě zkoumání jejich tloušťky, chemického složení, tvrdosti, adheze, náchylnosti k šíření teplotních trhlin a trvanlivosti. Zjištění těchto vlastností je důležité pro vývoj nových povlaků.

1 Princip PVD povlakování

Metoda PVD (Physical Vapour Deposition – fyzikální napařování) je jednou ze dvou základních skupin metod sloužících k vytváření tenkých vrstev na slinutých karbidech. Druhou skupinou metod povlakování je CVD (Chemical Vapour Deposition – chemické napařování z plynné fáze) [1].

PVD povlaky vznikají ve vakuových komorách při nízkém tlaku v rozmezí 0,1 až 1 Pa kondenzací atomů či shluků atomů uvolňovaných ze zdrojů částic. Jako zdroje částic slouží targety neboli terče. Uvolněné částice jsou ionizovány, reagují s atmosférou vakuové komory tvořené inertním a reaktivním plynem. Záporné předpětí je urychluje k povrchu povlakovaného substrátu, kde se částice usazují v podobě tenké homogenní vrstvy. Nejprve jsou atomy zachyceny procesy chemické nebo fyzikální sorpce, pohybují se po povrchu a následně se uvolní zpět nebo se zachytí trvalou vazbou. S dříve zachycenými atomy se díky pohyblivosti po povrchu mohou spojit další dopadající atomy, čímž vzniknou zárodky, neboli jádra, a ostrůvky částic. Ty se následně spojují a tvoří souvislou, nadále rostoucí vrstvu [1,5,10].



Obr.1.1 Schéma vzniku PVD povlaku [1]



Obr.1.2 Modely růstu vrstvy PVD povlaku [1]

Kromě složitosti vakuových systémů je nevýhodou všech PVD metod i nutnost pohybovat povlakovanými předměty kvůli stínovému efektu. Tento efekt zapříčiňuje nerovnoměrné vytváření povlaku po celém povrchu. Na plochách, které neleží ve směru pohybu částic, je vzniklá vrstva nedokonalá nebo se vůbec netvoří [1].

Výhodami PVD povlakování je teplota procesu pohybující se i pod 500 °C (CVD 700 až 1200 °C) a také možnost povlakování ostrých hran. Poloměr zaoblení ostří nástroje může být i pod 20 μm. Ovlivnění mechanických vlastností substrátu je v porovnání s CVD metodou menší a zbytková napětí v povlaku jsou tlaková [1].

1.1 Naprašování

Naprašování je metoda, při níž dochází k depozici částic oddělených z povrchu zdroje fyzikálním odprašovacím procesem. Proces probíhá ve vakuu, případně za nízkého tlaku, menším než 0,7 Pa, aby se odprašené částice dostaly ze zdroje na substrát bez kolize s molekulami plynu. Možné je provádět naprašování i při vyšším tlaku, od 0,7 do 2 Pa. Částice odprašené z terče jsou tak „ohřívány“ srážkami s částicemi plynu [1].

Doutnavý výboj vytvořený elektrickým polem hoří ve velmi zředěném inertním plynu. Obvykle je to argon ve vakuové komoře, která plní funkci anody. Nad záporně nabitým terčem doutnavý výboj udržuje argonovou plazmu. Kladné ionty plazmy urychluje elektrické pole směrem na terč, kde z povrchu vyraží atomy a molekuly [1].

Touto metodou lze vytvořit povlaky z těžkovatelných materiálů bez ohřevu terče na vysokou teplotu, což je požadavek u odpařovacího procesu. Odprašovat můžeme široký rozsah pevných látek elektricky vodivých i nevodivých. Povlaky se vytváří ve srovnání s napařovacími metodami pomalu, avšak v případě naprašování čistých kovů je rychlost povlakování vysoká [1].

1.2 Napařování

U napařovacích metod se materiál odpařuje z ohříváných terčů. Substrát je připojen na předpětí buď stejnosměrným, nebo střídavým napájením. Napařovací metody mají oproti naprašovacím horší rovnoměrnost pokrytí v přímočarém směru, ale rychlost povlakování může být velmi vysoká. Proces probíhá ve vakuu při tlacích 10^{-3} až 10^{-8} Pa, při kterých je střední volná dráha (průměrná dráha částice mezi dvěma srážkami) velká. Atomy se po odpaření pohybují po nekolizních drahách, což je příčinou nerovnoměrnosti vrstvy. Ke zmenšení střední volné dráhy částic je do komory zařízení přiveden vhodný

plyn, například argon, a to pod tlakem 0,7 až 26,7 Pa. Odpařené složky prodělají vícenásobné srážky a povlak se tak vytvoří rovnoměrně [1].

Tato skupina metod je tříděna podle způsobu, jakým je odpařovaný materiál terče ohříván, jedná se o odporové odpařování, odpařování elektronovým paprskem, obloukové odpařování či laserem indukované odpařování. Všechny tři povlaky testované v praktické části této práce byly vytvořeny metodou obloukového odpařování [1].

1.2.1 Obloukové odpařování

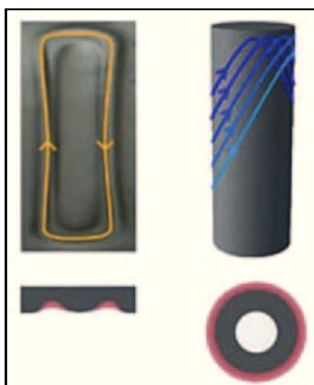
Při této metodě probíhá odpařování a ionizování materiálu prostřednictvím nízkonapěťového elektrického oblouku hořícího za nízkého tlaku. Materiál je dále urychlován směrem k nástrojům záporným předpětím, které je na ně přiloženo. Ionizované atomy po dosažení povrchu nástrojů vytvářejí povrchovými reakcemi vlastní deponovanou vrstvu. Na anodě, vakuové komoře, oblouk hoří po celé její ploše, kdežto na katodě, terči, hoří bodově. Takzvaná katodová skvrna o průměru 20 μm se po terči pohybuje náhodně. Odpaření libovolného elektricky vodivého materiálu je zajištěno velmi vysokou teplotou v místě katodové skvrny, a to až 20000 °C. Řízeného pohybu katodové skvrny docílíme použitím magnetického pole. Teploty substrátů při obloukovém odpařování se pohybují mezi 400 a 550 °C. To je nutné z hlediska tepelné a mechanické stability povlaků [1,10].

Obloukové systémy jsou dvojího druhu. U pulzního systému je oblouk opětovaně zapalován a zhasen kondenzátorem. Terč se tak mezi cykly chladí a klesá rychlost povlakování. Kontinuální systém je jednodušší a lépe využívá celý terč, ovšem při jeho použití se mohou tvořit také makročástice znečišťující povlak [1].



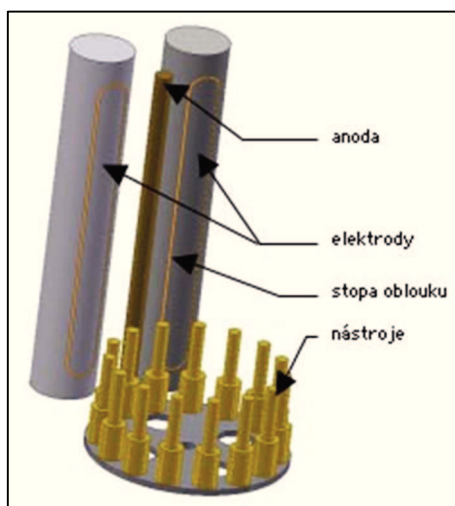
Obr.1.3 Povlakovací zařízení Platin π 80 [38]

Jednotlivá PVD zařízení pro tuto metodu povlakování se liší například možnostmi kontroly vlastností oblouků či uspořádáním povlakovací komory. Rozdílem mezi zařízeními je také schopnost vytvářet nanokrystalické kompozity nebo nanostrukturované vrstvy. Běžná PVD zařízení s planárními targety mají tu nevýhodu, že při použití silného magnetického pole dochází k jejich nadměrné a soustředěné erozi, což targety rychleji vyřadí z procesu. Tento problém lze odstranit použitím rotujících válcových elektrod, jejichž účinná plocha je větší a rotace zabraňuje statické erozi [10].

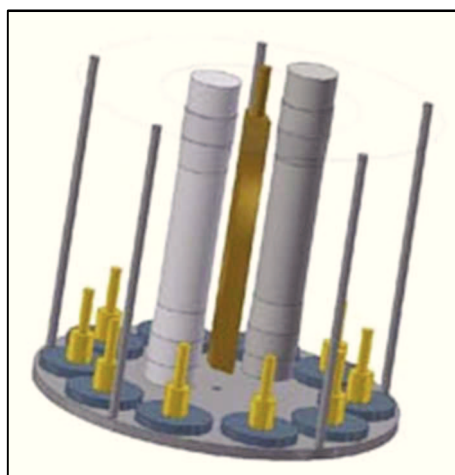


Obr. 1.4 Planární a válcový target [10]

Uspořádání povlakovacích komor může mít tři podoby. Elektrody se umísťují vně nástrojů, či do středu komory a zároveň centrálně vůči povlakovaným nástrojům. Třetí možností je kombinace obou způsobů. Je možné, aby se počet targetů na různých pozicích měnil a každý z nich plnil jinou funkci. Na každou z elektrod lze přivést jinou hodnotu proudu v určitém vzájemném poměru, což ovlivňuje stechiometrii, rychlost růstu i drsnost vrstev bez změny materiálu targetů. Parametry planetového pohybu nástrojů ve vztahu k proudům ovlivňují řezný výkon povlaků [10].



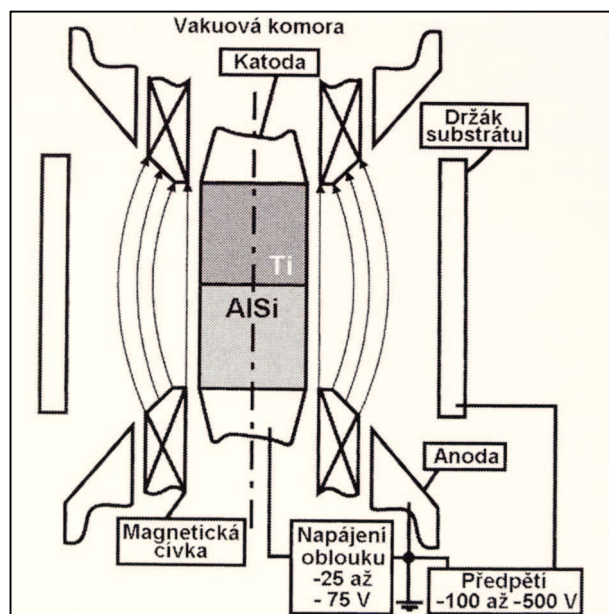
Obr.1.5 Bočně umístěné targety [10]



Obr.1.6 Centrálně umístěné targety [10]

Povlakovací cyklus začíná odčerpáním komory, pokračuje ohřevem, procesním čištěním, depozicí adhezních, následně výkonových vrstev a končí chladnutím. Tomuto cyklu předchází předpříprava nástrojů a jejich nakládání [10].

Jako příklad je na obrázku č. 1.7 zobrazeno schéma uspořádání zařízení pro vytváření povlaků TiAlSiN. Skládá se z centrální válcové katody rozdělené na dvě části, z nichž jedna je vyrobena z Ti a druhá z eutektické slitiny AlSi. Oba materiály se odpařují střídavě řízením katodové skvrny pomocí magnetického pole [1].



Obr.1.7 Schéma zařízení pro obloukové napařování [1]

1.3 Čištění a úprava nástrojů před povlakováním

Adheze povlaku k substrátu je ovlivňována kromě použité technologie nanášení také kvalitou bříty a broušených ploch, stejně tak jejich čistotou. Stopy po broušení a jiné ostré nerovnosti mohou zapříčinit odloupenutí povlaku v daném místě. Tomuto nepříznivému jevu lze zabránit mechanickou úpravou bříty a funkčních ploch. Mezi metody úpravy nástrojů patří broušení, leštění, kartáčování, odmašťování, mokré čištění, pískování, omílání, stripping (odstraňování povlaků) nebo iontové čištění v průběhu samotného povlakování ve vakuové komoře [1,7].

2 Typy PVD povlaků

2.1 Materiály, jejich vlastnosti a aplikace

2.1.1 TiN

Tento materiál je velmi odolný proti abrazivnímu opotřebení, má dobrou elasticitu a také adhezi. Tvrdost povlaku bývá v rozmezí 2000 až 2400 HV a odolává pracovním teplotám až 600 °C. Povlaky jsou žluto-zlaté barvy. Univerzálnost je výhodou tohoto materiálu a proto často bývá volen v situacích, kdy nejsme schopni přesně popsat proces, při kterém povlak použijeme. Je vhodný pro obrábění nízkými řeznými rychlostmi a obrábění ocelí s nízkou pevností nebo nerezových ocelí, litin a hliníkových slitin. Používá se jako adhezní vrstva pro široké spektrum substrátů. Používá se ale také pro dekorativní povlakování díky své žluto-zlaté barvě připomínající mosaz [1,3,5,12,13,16,17].

2.1.2 TiC

Povlaky TiC jsou velmi tvrdé, hodnoty tvrdosti se pohybují mezi 2300 až 2700 HV. Mají dobrou odolnost proti abrazivnímu opotřebení, což je dělá vhodnými pro obrábění při nízkých řezných rychlostech, při nichž narůstá abrazivní opotřebení. Povlaky jsou barvy šedé. Povlak TiC se však nevyznačuje dobrou chemickou stabilitou, odolností proti oxidaci a tvrdostí za tepla, což je důvod, proč není vhodný pro obrábění vysokými řeznými rychlostmi. TiC se používá jako mezivrstva pro zlepšení adhezní pevnosti mezi substrátem a vrchní vrstvou povlaku [1,18].

2.1.3 Materiály na bázi Al_2O_3

Přestože při nanášení povlaků z Al_2O_3 na slinuté karbidy hraje hlavní roli metoda CVD, tak dnešní moderní technologie umožňuje nanést tyto vrstvy i metodou PVD při nižších teplotách do 600 °C. Krystalická fáze Al_2O_3 se však tvoří za vysokých teplot a z toho důvodu se do vrstvy přidávají tzv. stabilizující prvky, jako například chrom. Oxid Cr_2O_3 vytváří s Al_2O_3 tuhý roztok a následně krystalickou fází a to za nižších teplot než čistý Al_2O_3 . Vlastnosti výsledného materiálu se však blíží vlastnostem čistého krystalického oxidu hlinitého. Al_2O_3 vyniká chemickou stabilitou, odolností proti oxidaci

a tvrdostí za tepla. Za nižších teplot je měkčí než TiC, TiAlN a TiCN, tvrdost se pohybuje kolem 2300 HV. Oxid hlinitý je tedy více trvanlivý při vyšších řezných rychlostech a lépe odolává tepelnému opotřebení. Má výbornou adhezi, vysokou pevnost a také nižší náchylnost k vymílání kráteru na čele nástroje. Povlak je charakteristický černou barvou. Z důvodu menší univerzálnosti se vrstvy na bázi Al_2O_3 kombinují s jinými vrstvami, hlavně TiAlN. Vhodné oblasti použití povlaků jsou například obrábění litin, austenitických a korozivzdorných ocelí či žárupevných slitin na bázi Ni, Co, Fe, Ti a to za intenzivních podmínek [1,2,4].

2.1.4 TiCN

V porovnání s TiN, ze kterého byl vyvinut, zde přidáný uhlík zpevňuje mřížku, zvyšuje vnitřní napětí, tím i mikrotvrdost a současně snižuje koeficient tření. Odolnost TiCN povlaku však sníží do teploty 400°C. Má dobrou houževnatost a odolnost proti abrazivnímu opotřebení, což ho činí vhodným k obrábění tvrdých materiálů. Není to však jeden materiál, TiCN molekuly totiž neexistují, ale jde o komplexní strukturu z vazeb TiN a TiC v krystalické matici. Z důvodu přítomnosti uhlíku je vhodné vrstvu TiCN chránit další vrstvou – tepelnou bariérou. Povlaky jsou charakteristické hnědou až bronzovou barvou a jsou tak stále vyhledávané také pro dekorační účely. Stejně jako v případě TiN a TiC lze i z TiCN vytvářet dobře přilnavé spodní vrstvy povlaků. Je doporučen pro povlakování fréz, vrtáků, výstružníků, závitníků a obrábění legovaných nebo nerezových ocelí [2,5,6,12,15,16,17].

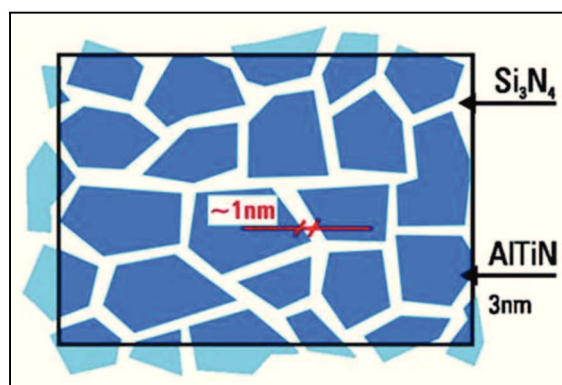
2.1.5 TiAlN-AlTiN

TiAlN je povlak vyvinutý z TiN a nabízí vyšší teplotní odolnost, vyšší tvrdost, i přes 3000 HV, a hlavně vysokou tvrdost za tepla, odolá teplotám až do 800°C. Zároveň má dobrou adhezi k mnoha druhům podkladových substrátů. Ovšem i tak nepřekonal TiN ve všech aplikacích, protože je méně univerzální. Nejedná se o jeden materiál, AlTiN molekuly neexistují. Je to komplexní struktura, která sestává z vazeb TiN a AlN v krystalické matici. Materiál má výborný poměr tvrdosti a houževnatosti díky multivrstvé struktuře. Barva povlaku může být od růzovofialové po černošedou. Označení AlTiN je používáno v případě, že je obsah Al, vyšší než 50 %. Při obsahu Al nad 65 až 70 % povlaky ztrácejí tvrdost a otěruvzdornost. Povlak je vhodný pro obrábění materiálů vyšších pevností při vyšších řezných rychlostech. Vlastnosti TiAlN ho činí vhodným pro obrábění

za vysokých teplot s minimálním použitím řezné kapaliny nebo i za sucha. Dobře se s ním obrábí Ti, Al a Ni slitiny, legované a nerezové oceli nebo litiny [5,6,16,17,18].

2.1.6 TiAlSiN

Si jako přísada v TiAlN povlacích zvyšuje tvrdost a odolnost proti chemickým reakcím. Tvrdost se může pohybovat okolo 4500 HV a maximální provozní teplota až 1200 °C. Těchto vysokých hodnot lze dosáhnout právě díky přítomnosti křemíku ve struktuře, který podporuje vznik nanokompozitního povlaku. Zvýšená chemická inertnost je vhodná pro vysokorychlostní obrábění tvrdých abrazivních materiálů za sucha nebo s minimem řezné kapaliny. Amorfni matrice z nitridu křemíku brání růstu nanokrystalických zrn TiAlN a tvrdost tak zůstává velmi vysoká [1,6,12].



Obr.2.1 Schéma nanokompozitní struktury povlaku $nc-Ti_{1-x}Al_xN/a-Si_3N_4$ [6]

2.1.7 CrN

Tento kovově stříbrný povlak v porovnání s TiN povlaky vyniká korozní odolností, nižším koeficientem tření a také nižším zbytkovým napětím. Není tak tvrdý jako TiN, tvrdost dosahuje 1700 až 2100 HV, ale snese teploty až 700 °C. Má výbornou přilnavost k podkladu. Používá se k obrábění materiálů z Cu, slitin Al a jiných neželezných slitin [17,18].

2.1.8 ZrN

Vlastnosti povlaků ZrN jsou velmi podobné povlakům z TiN. Tvrdost vrstvy se pohybuje kolem 2400 HV, maximální provozní teplota je 550°C a povlak má dobrou odolnost proti opotřebení. Jeho barva je velmi podobná zlatu. Pomáhá redukovat tvorbu nárůstků na břitech při obrábění Ti nebo Al slitin s Mg [5,12].

2.2 Vliv přítomnosti prvků na vlastnosti

Cr/Y – zlepšují korozní a oxidační odolnost TiAlN povlaků. Y mimo to napomáhá ke zjemňování zrna a díky tomu v povlacích vznikají nižší zbytková napětí. Chrom u těchto povlaků zlepšuje odolnost proti abrazivnímu otěru a také tepelnou odolnost [1].

V - v mřížce TiN zvyšuje tvrdost, ovšem větší množství vanadu snižuje houževnatost povlaku. Dosažení jeho optimálního množství je důležité pro aplikace s vyššími nároky na odolnost proti opotřebení [1].

B - v povlacích s TiAl zlepšuje odolnost proti abrazivnímu opotřebení. Tvorba kubického nitridu boru ve struktuře TiN snižuje tření a zvyšuje tvrdost povlaku. V mřížce TiAlN zlepšuje řezný výkon [1].

2.3 Vliv struktury a tloušťky vrstev na vlastnosti povlaků

2.3.1 Vývojové stupně povlakovaných slinutých karbidů

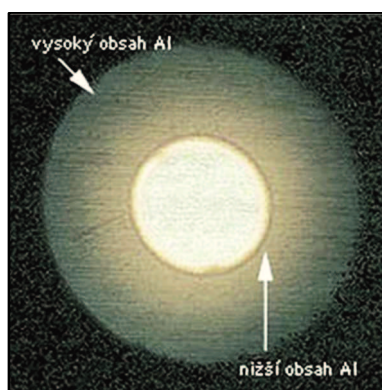
Povlak první generace byl jednovrstvý, převážně z TiC, silný přibližně 6 μm a vyznačoval se špatnou soudržností s podkladem. Při obrábění se povlak začal z nástroje odlupovat velmi brzy. Povlaky druhé generace byly také pouze jednovrstvé z materiálů TiC, TiN, TiCN s tloušťkou 7 až 10 μm, ale s menším nebezpečím odloupenutí. Teprve se třetí generací přišly vícevrstvé povlaky s minimálně dvěma vrstvami a ostře ohraničenými přechody mezi nimi. Jako první jsou obvykle nanášeny adhezní vrstvy mající nižší odolnost proti opotřebení v porovnání s vrstvami vrchními. Hlavními požadavky na vrchní vrstvy jsou vysoká tvrdost, odolnost proti opotřebení a oxidaci za vysokých teplot. Čtvrtá generace přinesla speciální vícevrstvé – multivrstvé povlaky [1].

2.3.2 Druhy vrstev

Z důvodu zvýšených požadavků na tepelnou a chemickou stabilitu byly vyvinuty strukturované vrstvy, což umožnilo zlepšit jejich fyzikálně-chemické vlastnosti. Strukturované vrstvy lze rozdělit na:

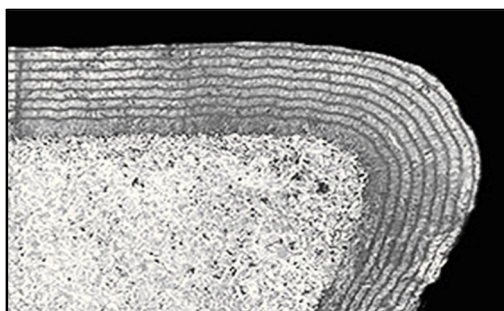
Monovrstvy – lze je vytvářet i bez podkladové vrstvy. Výhodou toho je rychlost depozice, v jejímž průběhu jsou všechny targety stejné. Ovšem v případě povlaků s vyšším obsahem hliníku by adhezní vrstva měla být použita [19].

Gradientní vrstvy – v tomto druhu vrstev se průběžně mění jejich složení směrem od substrátu tak, aby bylo dosaženo nejvyšší tvrdosti na povrchu vrstvy. V případě vrstev z TiAlN se směrem k povrchu zvyšuje obsah hliníku. To zajistí vyšší oxidační odolnost a zároveň dostačující tvrdost vrstvy [9,19].

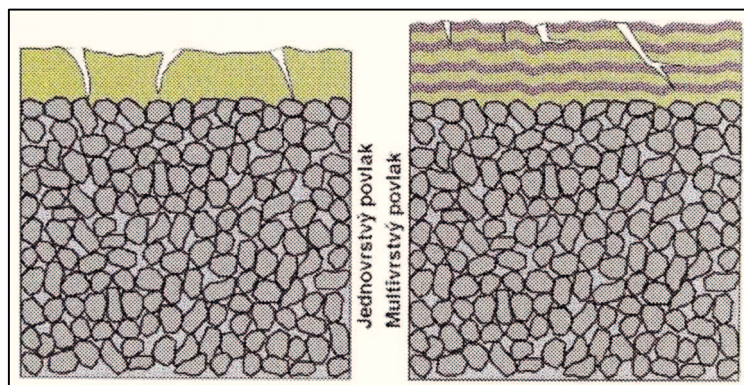


Obr.2.2 Gradientní povlak TiAlN [39]

Multivrstvy – jsou složené z více než deseti vrstev a mezivrstev s různě výraznými přechody. Velkou předností multivrstvé struktury je odklánění a zpomalování šíření trhlin od povrchu k substrátu a zvýšená houževnatost, proto jsou obvykle využívány při vysokém dynamickém zatížení. Multivrstvy lze vytvářet ve větších tloušťkách oproti monovrstvám [9,19,20,22].

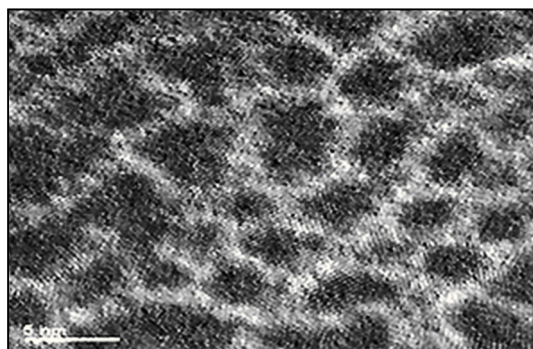


Obr.2.3 Multivrstvý povlak [21]



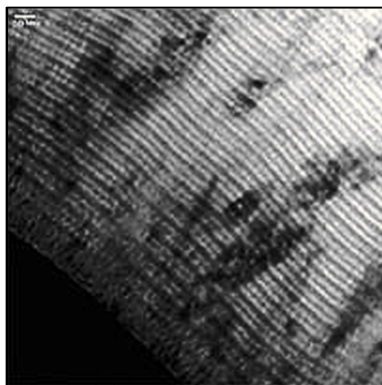
Obr.2.4 Vliv multivrstvého povlaku na šíření trhlin [1]

Nanokompozitní vrstvy – vytváří se ze dvou a více vzájemně nerozpustných složek, z nichž minimálně jedna musí být krystalická, přičemž monokrystaly jsou menší než 10 nm. Nanokrystaly zakotvené v amorní matici mají velmi tenké mezikrystalické hranice (pod 1 nm), které slouží jako bariéra proti šíření poruch a díky tomu je tvrdost nanokompozitních vrstev vysoká. Zároveň jsou termodynamicky stabilní a nedochází v nich k růstu zrn při vyšších teplotách [1,9,20].



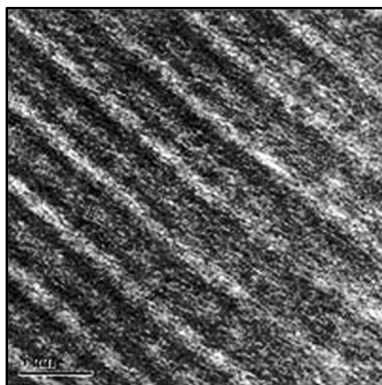
Obr.2.5 Nanokompozitní struktura povlaku $nc-Ti_{1-x}Al_xN/a-Si_3N_4$ [40]

Nanovrstvy (supermřížky) – v zásadě jde o multivrstvé systémy složené z velmi tenkých vrstev, jejichž tloušťka rozhoduje o výsledných vlastnostech a optimálně se pohybuje mezi 3 a 10 nm v závislosti na složení povlaku. Za podmínky, že jsou rozhraní mezi nanovrstvami dostatečně ostrá, lze najít takovou supermřížkovou periodu střídání vrstev, při které se tvrdost výrazně zvýší [9,20,22].



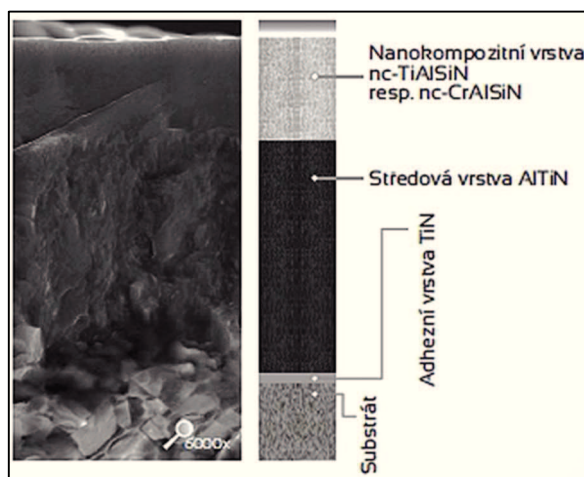
Obr.2.6 Nanovrstevný povlak [20]

Kombinace nanovrstev a nanokompozitů – spojuje výhody obou nano struktur.



Obr.2.7 Povlak kombinovaný z nanokompozitů a nanovrstev [20]

TripleCoatings – v současnosti jsou vrcholem technologie PVD povlakování. Struktura základních variant těchto povlaků je tvořena adhezí vrstvou TiN nebo CrN o přibližné tloušťce 200nm. Prostřední houževnatá vrstva je obvykle vyrobena z materiálů AlTiN, AlCrN, AlTiCrN jako monovrstva, gradientní vrstva, multivrstva nebo nanovrstva. Povrchová nanokompozitní vrstva (TiAlSiN nebo CrAlSiN) je extrémně tvrdá za tepla a vysoce odolná proti abrazivnímu opotřebení [11].



Obr.2.8 Struktura TripleCoatings [20]

TripleCoatings jsou určeny především pro velmi náročné aplikace. Různé verze či modifikace povlaku jsou vhodné například pro obrábění superslitin, abrazivních materiálů za sucha, vysokorychlostní obrábění, ale i univerzální použití. Při soustružení překonávají i povlaky s vrstvou Al_2O_3 . Pro frézování jsou vhodné TripleCoatings na bázi chromu. Trojitá struktura umožňuje vytvořit povlak o větší tloušťce, což je velmi výhodné při vrtání. Jsou použitelné pro různé účely, ovšem nejlepších výsledků je s nimi dosahováno v oblasti vysoko-výkonnostního obrábění [11,19,23].

2.3.3 Tloušťka vrstev

Tloušťka je jednou ze základních vlastností povlaků řezných nástrojů, která ovlivňuje kromě trvanlivosti nástroje také řezné síly v průběhu obrábění. Je důležité, aby se tloušťka zvolila přesně podle nároků dané aplikace, pro kterou je povlak navrhován [1].

Tloušťka vrstvy na břitu nástroje a plochách se značně odlišuje. V praxi jsou používány povlaky v přibližném rozsahu 2 až 12 μm . HUMÁR [1] jako příklad uvádí, že optimální tloušťka povlaků na závitnících bývá kolem 1 až 2 μm , zatímco na odvalovacích frézách i 8 μm . Jen ve zvláštních případech se použijí vrstvy silnější než 12 μm [1,2,8].

Velmi tlusté vrstvy totiž zhoršují výkonnost břitových destiček. S rostoucí tloušťkou vrstvy narůstá její odolnost proti opotřebení, ale zároveň se zvýší křehkost a vrstva se snadněji odlupuje. V případech, kdy je břit namáhán rázy, dochází u povlaků větších tlouštěk k mikrovýdrolování. Z tohoto důvodu se pro frézování hodí tenké povlaky s dobrou houževnatostí vytvořené PVD technologií. Tloušťka povlaku neovlivňuje zbytkové napětí vzniklé při povlakování [1].

3 Metody charakterizace vlastností a zkoušení povlaků

Základní vlastnosti povlaků porovnávaných v této bakalářské práci byly vyhodnoceny následujícími metodami: tloušťka světelnou mikroskopií, složení vrstev skenovací elektronovou mikroskopií, adheze povlaku vrypovou zkouškou a tvrdost měřením Vickersovou metodou. Náchylnost k šíření teplotních trhlin se zjistila řeznou zkouškou. Trvanlivost a řezivost VBD byla určena dlouhodobou zkouškou trvanlivosti.

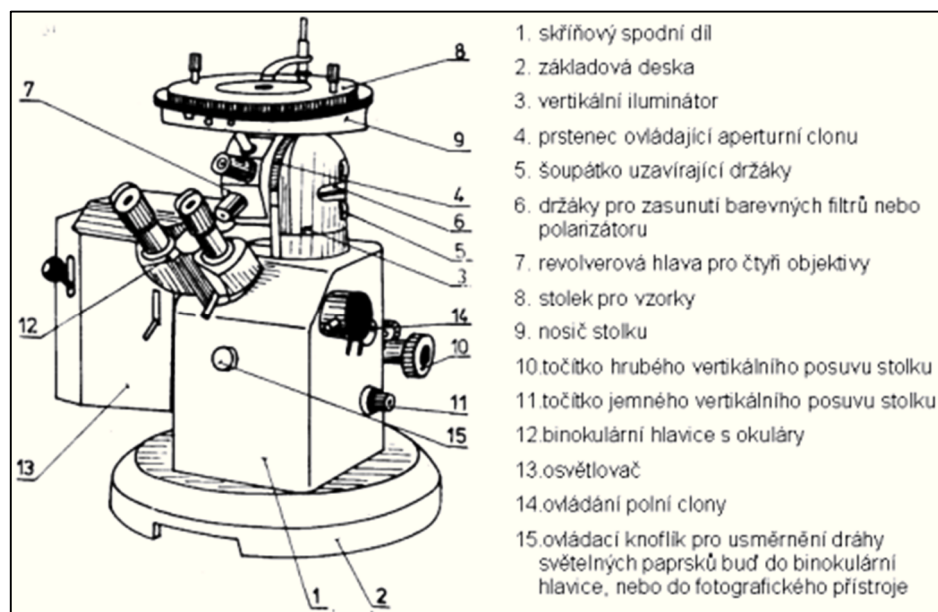
3.1 Světelná mikroskopie

Světlo lze popsat vlnovým modelem popisujícím světlo jako vlnění, kvantovým modelem popisujícím jej jako proud fotonů a geometrickým modelem využívajícím pojem světelný paprsek. Paprsek se homogenním prostředím šíří přímočaře a v nehomogenním prostředí dochází k jeho lomu, odrazu, ohybu nebo absorpci [24].

Mikroskop je složen z mechanické části (podstavec, stojan a stolek s křížovým posunem), osvětlovací části (zdroj světla, kondenzor, clona) a optické části (objektivy a okuláry). Objektiv mikroskopu se skládá z čoček. Na rozhraní čočky a prostředí se světlo láme. Ostrý obraz vzniká šířením světelných paprsků z určitého bodu předmětu různými směry. Paprsky dopadnou na čočku a sbíhají se do jednoho bodu v obrazové rovině. Čočky objektivu vytváří skutečný převrácený obraz objektu, jež se promítá mezi ohnisko okuláru a okulár. Okulárem tento obraz pozorujeme jako pod lupou a vidíme zdánlivý zvětšený obraz [24].

Minimální vzdálenost dvou ještě rozlišitelných bodů nazýváme rozlišovací schopnost mikroskopu. Je dána zářením a vlastnostmi objektivu. Platí, že nelze rozlišit body, jejichž vzdálenost je menší než polovina vlnové délky záření. Zvětšení mikroskopu je násobkem zvětšení objektivu a okuláru [24].

V experimentální části byl pro měření tloušťky povlaků vzorků použit převrácený mikroskop Le Chatelierova uspořádání. Vzorky se umísťují na stolek měřenou rovinou kolmo na optickou osu. Výhodou uspořádání je snadnější zaostřování a výměna vzorku [25].



Obr.3.1 Schéma mikroskopu Le Chatelierova uspořádání [25]

3.2 Skenovací elektronová mikroskopie

Skenovací elektronový mikroskop (SEM) lze analogicky přirovnat ke světelnému mikroskopu. Na rozdíl od něho je ale výsledný obraz tvořen pomocí odražených nebo sekundárních elektronů. Primární svazek elektronů urychlený magnetickými čočkami se pohybuje jen po určité ploše preparátu. Rozlišovací schopnost elektronových mikroskopů je v řádu desítek nm a lze jimi pozorovat i větší makromolekuly. To je umožněno velmi krátkou vlnovou délkou, kterou má urychlený elektron. SEM mají velkou hloubku ostrosti – tloušťka vrstvy, ve které jsou předměty zobrazeny ostře. Mimo tuto vrstvu se předměty nezobrazují, nebo je vidíme rozostřeně. Jednou z výhod SEM je, že v komoře při vzájemné interakci urychlených elektronů se vzorkem vzniká například rentgenové záření, které může poskytnout další informace o vzorku [26,27,28,29].

SEM využívají dva základní druhy detektorů elektronu. Detektory sekundárních elektronů (SE) lze vytvořit snímky povrchu předmětu o vysokém rozlišení, které odhalují detaily menší než 1 nm a poskytují lepší informace o topografii povrchu. Detektory odražených elektronů (BSE) umožňují vytvářet šedoškálové snímky materiálů s vysokým kontrastem mezi jednotlivými fázemi. Metoda je vhodná při snímání rovných leštěných povrchů [32,41].

Chemické složení je možné zjistit tzv. energiově-disperzní spektroskopickou analýzou (EDS analýza), jejímž principem je měření rentgenového záření vzniklého důsledkem kolize urychleného primárního elektronu s elektronem prvku, který je tak vyražen ze své

pozice. Vyražený elektron je následně nahrazen elektronem s větší energií a ten při změně energetické hladiny emituje rentgenové záření. Prvek a jeho množství můžeme stanovit podle zachycené energie rentgenového záření. Oblast měření při EDS analýze je 1 až 3 μm , proto vyšší drsnost nebo heterogenita povrchu nevadí [26,27,28,29].

3.3 Měření tvrdosti podle Vickerse

Do materiálu se vtlačuje diamantové těleso ve tvaru pravidelného čtyřbokého jehlanu se čtvercovou základnou a vrcholovým úhlem 136° . Mezi podmínky provedení zkoušky patří zvolené zatížení podle tabulky č. 3.1 [42].

Tab.3.1 Rozdělení Vickersovy metody podle zatížení [42]

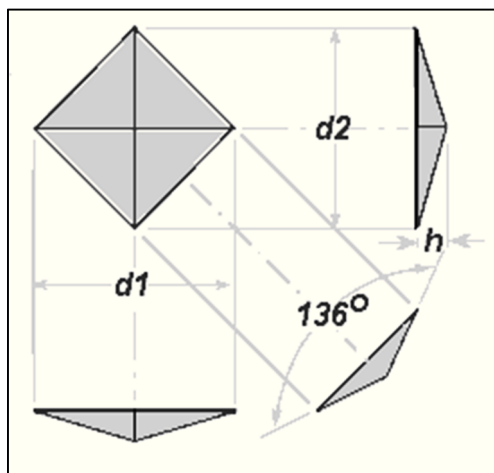
Označení	Značení tvrdosti	Zkušební zatížení [N]
Zkouška tvrdosti	HV 5 ÷ HV 100	49,03 ÷ 980,7
Zkouška tvrdosti při nízkém zatížení	HV 0,2 ÷ < HV 5	1,961 ÷ < 49,07
Zkouška mikrotvrdosti	< HV 0,2	< 1,961

Vzorek musí být čistý a položený na tuhé podložce tak, aby se v průběhu zkoušky nepohnul. Zatížení směřuje kolmo k povrchu vzorku a tělísko se vtlačuje bez rázů a chvění [42].

Tvrdost podle Vickerse je vyjádřena bezrozměrně a určí se jako poměr zkušebního zatížení k ploše povrchu vtisku podle následujícího vzorce [42].

$$HV = 0,102 \cdot \frac{2 \cdot F \cdot \frac{136^\circ}{2}}{d^2} = 0,1891 \cdot \frac{F}{d^2}$$

- F – zkušební zatížení v N
- d – aritmetický průměr délek úhlopříček d_1, d_2 v mm



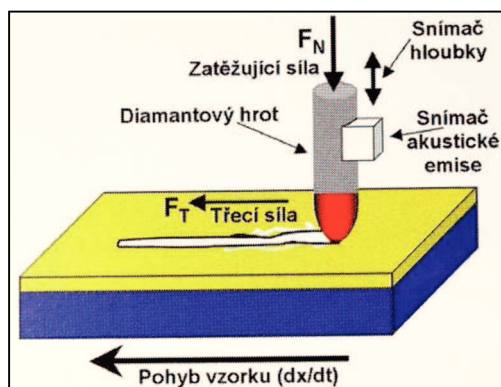
Obr.3.2 Schéma vtisku [30]

3.4 Vrypová zkouška – scratch test

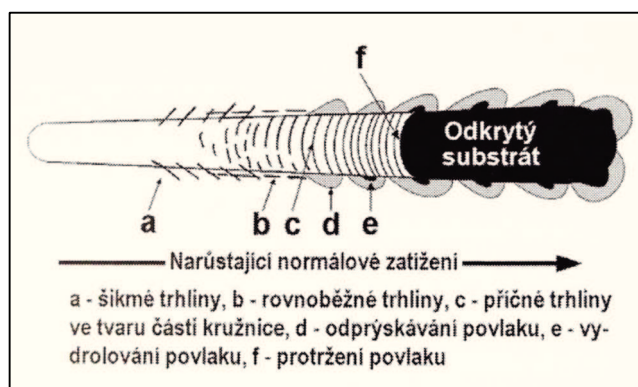
Adheze povlaku neboli přilnavost je vlastnost závisající na jeho tloušťce, materiálu substrátu i samotného povlaku a také na čistotě povrchu daného substrátu. Pro vyhodnocování adheze povlaku k substrátu se běžně používá metoda scratch-test. Principem testu je posouvání diamantového kužele – Rockwellova hrotu po povlaku a jeho zatěžování konstantní nebo zvyšující se silou v rozsahu 0 až 200 N. Rockwellův indentor má vrcholový úhel 120° a poloměr zaoblení špičky 0,2 mm. Použití této metody je doporučeno pouze pro vrstvy o tloušťce mezi 0,1 a 30 μm [1,8,31].

V oblasti kolem indentoru je do povlaku přeneseno velké množství deformační práce. Jsou zde tři druhy složek napětí, a to elasticko-plastické vnikací napětí, napětí vyvolané tangenciální třecí silou a vnitřní napětí materiálu povlaku. K destrukci dochází postupně tak, že se nejprve objeví vlasové trhlinky uvnitř vrypu, následně odprýskávání a vydrolování povlaku na okraji vrypu, nakonec může dojít k celkovému oddělení povlaku [1].

Kritickou hodnotu zátěžné síly při odtržení vrstvy můžeme zjistit detekováním zvýšené akustické emise nebo pomocí mikroskopu, kterým zjistíme vzdálenost místa odtržení povlaku od místa začátku měření. Následně podle závislosti dráhy hrotu na zátěži můžeme tuto kritickou hodnotu stanovit [1].



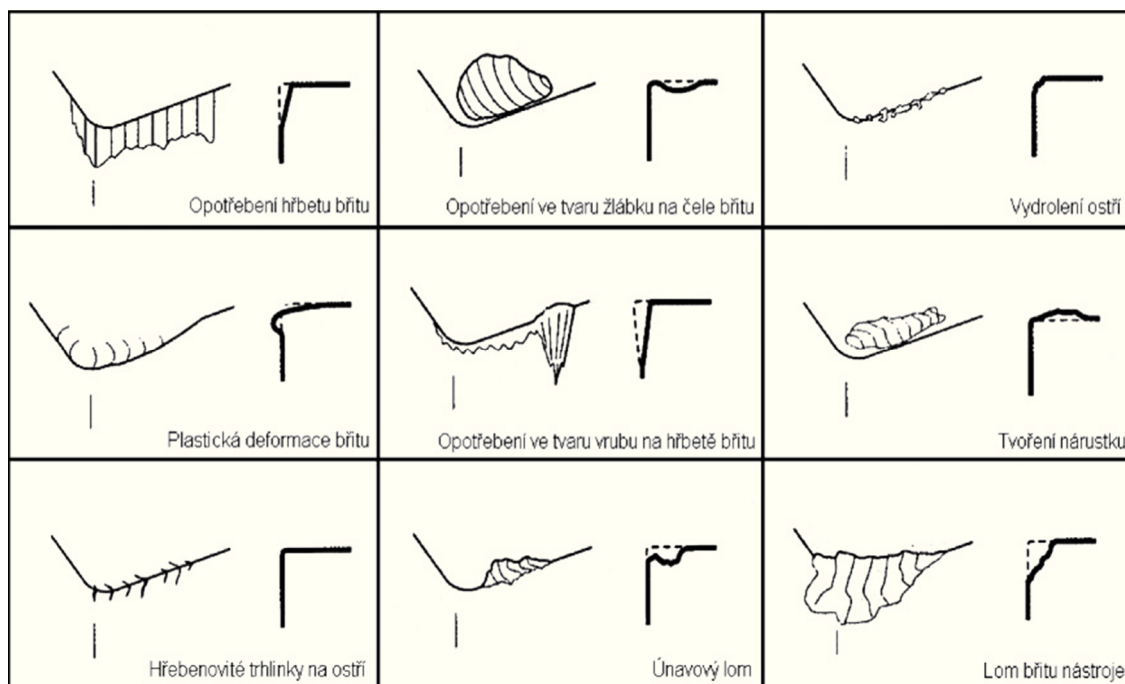
Obr.3.3 Princip vrypové zkoušky [1]



Obr.3.4 Stopy vrypu a poškození [1]

3.5 Opotřebení, trvanlivost a řezivost nástroje

V průběhu obrábění je materiál břitu namáhán tepelným zatížením a při obrábění přerušovaným řezem je toto namáhání dynamické. Čistý kovový povrch obrobku vzniklý při vysokém tlaku a teplotách je náchylný k chemickým reakcím nebo difúzním procesům. Částice či vměstky v obráběném materiálu s vysokou tvrdostí způsobují abrazivní a brousící efekt. Opotřebení tedy vzniká kombinací faktorů, z nichž nejdůležitější je mechanický, tepelný, chemický a abrazivní. Jejich působením vznikají základní mechanismy opotřebení, mezi něž patří abraze, adheze, difúze, oxidace, plastická deformace či křehký lom. Opotřebení lze vyhodnotit měřením a kontrolou trvanlivosti. Na obrázku č. 3.5 jsou klasifikovány nejdůležitějších typů opotřebení [2,36,37].



Obr.3.5 Klasifikace typů opotřebení [37]

Trvanlivost je určena jako součet čistých časů řezání od začátku obrábění do té doby, kdy břit přestává plnit určené úkoly. To lze poznat na tvaru a rozměrech obrobku, jakosti obrobené plochy a také na opotřebení nástroje. Břit se vyměňuje před vynuceným přerušením operace, neboť by mohlo dojít i ke vzniku zmetků v důsledku lomu bříty. Trvanlivost tedy závisí na opotřebení, ne na lomu. Stanovení kritérií trvanlivosti je ovlivněno také druhem operace, kdy například u hrubovacích operací se toleruje větší opotřebení a trvanlivost závisí na kontrolovatelném odchodu třísky nebo na hrozbě rizika náhlého lomu. Trvanlivost je značena **T** a uvádí se v minutách. Při dlouhodobých zkouškách trvanlivosti jsou podmínky blízké reálnému procesu obrábění [2,33,36].

Řezivost je vlastnost umožňující nástroji efektivně odebírat třísku. Závisí na faktorech, mezi něž patří fyzikální a mechanické vlastnosti nástroje, jeho geometrie, řezné podmínky a prostředí i obráběný materiál. Kritériem hodnocení je závislost $T-v_c$ [36].

3.6 Teplotní trhliny

Teplotní trhliny jsou typem opotřebení, které vzniká v důsledku nadměrných výkyvů teplot – tepelným šokem, a to při obrábění s přerušovaným řezem, případně přiváděním nestejnoměrného množství kapaliny. Trhliny jsou malé a vznikají kolmo na řeznou hranu. Mezi trhlínami může docházet k vydrolování řezné hrany (vylamování malých částek), což vede až k náhlému lomu bříty [2,37].

4 Experimentální část

4.1 Charakterizace substrátu SK, povlaků, VBD a nástrojů

Substrát

Substrát VBD je tvořen ze středo-jemnozrnného karbidu wolframu s malým obsahem kubických karbidů obsahujících tantal a niob (1,5 %) a s relativně vysokým obsahem kobaltové pojící fáze (10,2 %). Tvrdost samotného substrátu činí 1310 HV a Palmqvistova houževnatost 1950 N/mm².

Povlaky

Vzorek č. 1 - TiN + monovrstva TiAlSiN + TiN

Vzorek č. 2 - TiN + nanovrstvy TiAlN + AlTiN

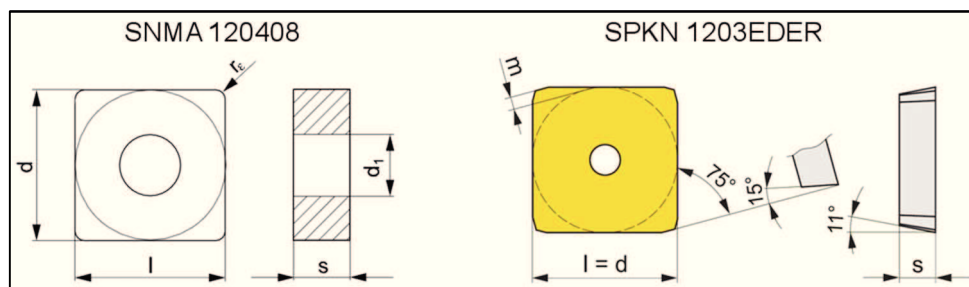
Vzorek č. 3 - TiN + nanovrstvy AlTiN + TiN

VBD

Tabulka č. 4.1 a obrázek č. 4.1 uvádí typy a rozměry VBD použitých při zkouškách šíření teplotních trhlin a trvanlivosti.

Tab.4.1 Typy a rozměry VBD

Zkouška	Typ	Rozměry	
Měření tloušťky	SNMA 120408	$l = d$	12,7 mm
		d_1	5,16 mm
		s	4,76 mm
Zkouška šíření teplotních trhlin a dlouhodobá zkouška trvanlivosti	SPKN 1203EDER	$l = d$	12,7 mm
		s	3,18 mm
		m	0,88 mm



Obr.4.1 Použité VBD [35,43]

Nástroje

Tab.4.2 Použité nástroje

Zkouška	Nástroj
Zkouška šíření teplotních trhlin	100B07R-W75SP12D
Dlouhodobá zkouška trvanlivosti	125B09R-W75SP12D

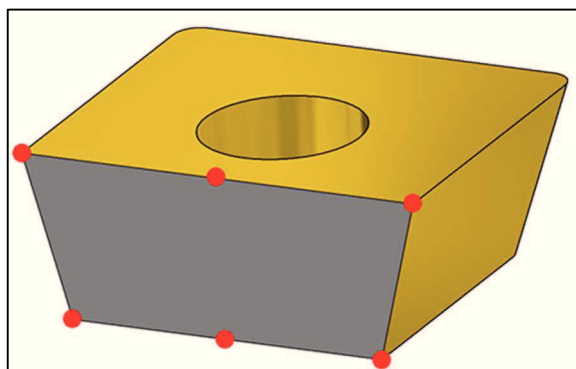
4.2 Měření tloušťky

4.2.1 Výbrus vyměnitelných břitových destiček

Vzorky byly nejprve broušeny na diamantovém kotouči o zrnitosti 250 μm při otáčkách 200 min^{-1} po dobu 3 min, poté na litinovém kotouči s diamantovým práškem o zrnitosti 15 μm a s petrolejem při otáčkách 400 min^{-1} po dobu 10 min. Následně byly vzorky leštěny na kotouči TexMet s diamantovým práškem o zrnitosti 7 μm při otáčkách 400 min^{-1} po dobu 10 min a nakonec byly doleštěny na kotouči TexMet s diamantovým práškem o zrnitosti 1 μm při otáčkách 400 min^{-1} po dobu 10 min. Při všech krocích byl použit přítlak 70 bar a vzorky byly chlazeny vodou. Mezi jednotlivými kroky byly vzorky očištěny kartáčem a omyty horkou vodou, na závěr byly očištěny benzínem.

4.2.2 Popis měření

Vzorky byly měřeny na optickém mikroskopu Neophot 30 při zvětšení 1000x. Před vlastním měřením byl povrch vzorků očištěn benzínem. Obraz z mikroskopu by pomocí kamery nasnímán do počítače, kde byla pomocí softwaru QickPhoto změřena tloušťka povlaků. Tloušťka jednotlivých povlaků byla měřena na šesti místech řezné hrany (viz obrázek č. 4.2) - na obou špičkách destičky a v polovině řezné hrany, a to na čele i na dosedací ploše, pro zjištění rovnoměrnosti nanesení povlaku na destičce. V tabulce č. 4.3 jsou shrnuty naměřené hodnoty a na obrázcích č. 4.3 a č. 4.4 jsou uvedeny některé snímky použité k měření.

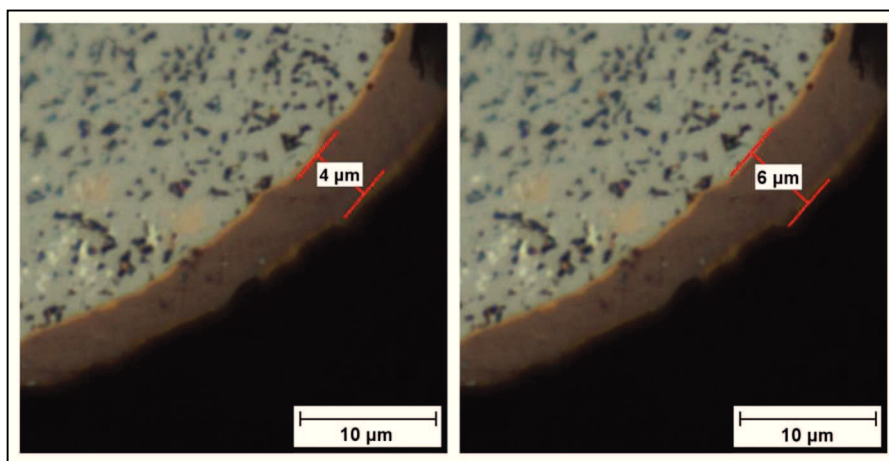


Obr.4.2 Místa měření tloušťky

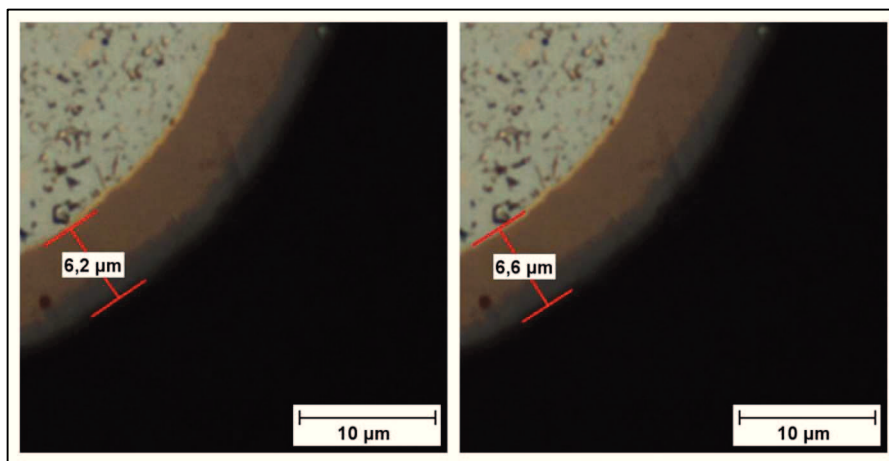
4.2.3 Výsledky měření

Tab.4.3 Naměřené hodnoty

Pozice	Naměřené hodnoty [μm]					
	vzorek č.1		vzorek č.2		vzorek č.3	
	TiAlSiN	TiN+ TiAlSiN+ TiN	TiAlN+ AlTiN	TiN+ TiAlN+ AlTiN	TiAlN	TiN+ TiAlN+ TiN
čelo kraj 1	4,0	6,0	6,2	6,6	7,6	8,7
čelo střed	1,1	1,6	2,5	2,7	2,9	3,4
čelo kraj 2	4,2	6,2	6,3	6,7	7,7	8,8
dosedací plocha kraj 1	4,3	6,3	6,2	6,5	7,5	8,6
dosedací plocha střed	1,2	1,7	2,6	2,8	3,0	3,5
dosedací plocha kraj 2	4,1	6,1	6,4	6,8	7,6	8,9



Obr.4.3 Vzorek č. 1: čelo – kraj 1



Obr.4.4 Vzorek č. 2: čelo – kraj 1

Tab.4.4 Aritmetické průměry hodnot tlouštěk

vzorek	1.	2.	3.	4.	5.	6.
	čelo-kraj	dosedací-kraj	kraj	čelo-střed	dosedací-střed	střed
Tloušťka bez TiN vrstev [μm]						
č. 1	4,1	4,2	4,15	1,1	1,2	1,15
č. 2	6,25	6,3	6,28	2,5	2,6	2,55
č. 3	7,65	7,55	7,6	2,9	3	2,95
Celková tloušťka (s TiN) [μm]						
č. 1	6,1	6,2	6,15	1,6	1,7	1,65
č. 2	6,65	6,65	6,65	2,7	2,8	2,75
č. 3	8,75	8,75	8,75	3,4	3,5	3,45

- sloupec – aritmetický průměr z obou hodnot pro tloušťky na kraji na čele
- sloupec – aritmetický průměr z obou hodnot pro tloušťky na kraji dosedací ploše
- sloupec – aritmetický průměr pro hodnoty ve sloupci 1. a 2.
- sloupec – hodnota tloušťky na středu na čele
- sloupec – hodnota tloušťky na středu na dosedací ploše
- sloupec – aritmetický průměr pro hodnoty ve sloupci 4. a 5.

Tab.4.5 Porovnání tlouštěk krajů a středů

Poměr tloušťka na krajích : tloušťce uprostřed			
Vzorek	1	2	3
bez TiN	3,61	2,46	2,58
s TiN	3,73	2,42	2,53

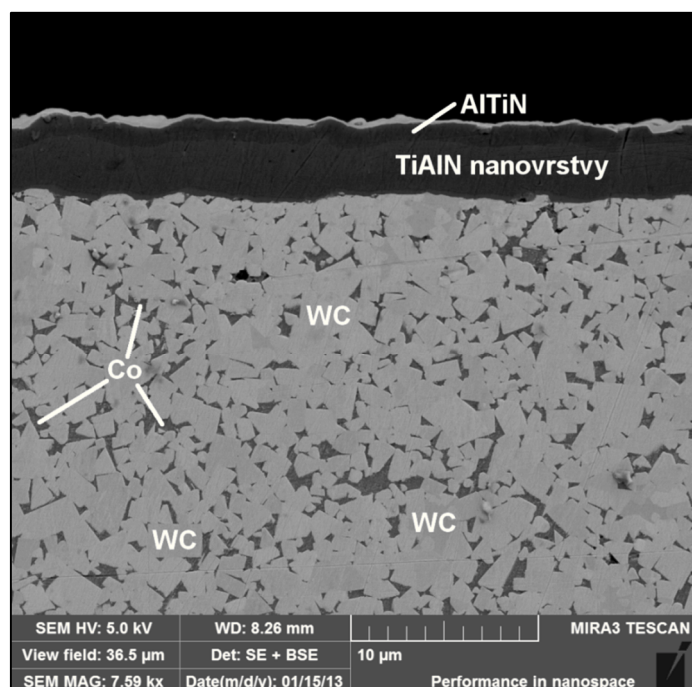
4.3 Analýza chemického složení

4.3.1 Popis analýzy

Složení povlaků bylo stanoveno prvkovou analýzou pomocí EDX analyzátoru. Snímky vzorků byly pořízeny skenovacím elektronovým mikroskopem MIRA3 LMH firmy Tescan. Mikroskop je vybaven autoemisní katodou určenou pro snímání preparátů ve vysokém rozlišení. Vzorky byly snímány při zvětšení 7590x, pracovní vzdálenosti přibližně 8 mm a urychlovacím napětí elektronového svazku 5 kV. Obraz byl získán pomocí detektoru sekundárních elektronů a detektoru odražených elektronů.

4.3.2 Výsledky analýzy

Jako příklad je na obrázku č. 4.5 uveden pouze snímek vzorku č. 2, na kterém se provedla prvková EDX analýza dvou vrstev, a to prostřední tvořené TiAlN nanovrstvami a povrchové AlTiN. U ostatních vzorků byla zanalyzována jedna vrstva (vzorek č. 1 – monovrstevný povlak TiAlSiN, vzorek č. 3 – povlak AlTiN tvořený nanovrstvami).



Obr.4.5 STM snímek vzorku č. 2

Vzorek č. 1 – povlak je tvořen podkladovou a povrchovou vrstvou TiN, mezi nimiž je monovrstevný povlak TiAlSiN. Monovrstva obsahuje větší množství titanu, než hliníku. Jejich procentuální poměr je 22,3 % ku 14,6 %. Křemík tvoří 2,9 % této vrstvy.

Vzorek č. 2 – vícevrstvý povlak TiAlN tvořený nanovrstvami je složen z 22,3 % z titanu a 18,6 % z hliníku. V povrchové vrstvě AlTiN naopak převažuje hliník nad titanem v poměru 26,2 % ku 13,2 %.

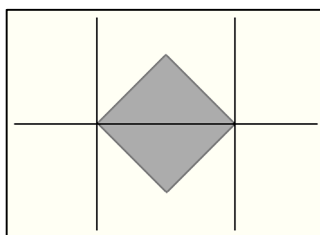
Vzorek č. 3 – ve vícevrstvě povlaku AlTiN tvořém nanovrstvami má větší zastoupení hliník s 21,9 %. Titan tvoří 17,3 % vrstvy.

4.4 Měření tvrdosti podle Vickerse

4.4.1 Popis měření

Tvrdost byla měřena na tvrdoměru firmy Frank s diamantovým tělesem ve tvaru pravidelného čtyřbokého jehlanu se čtvercovou základnou a vrcholovým úhlem 136° , při zatížení 294 N a délce vtisku 10 s. Všechny vzorky byly měřeny třikrát. Při zvoleném zatížení jsou výsledky měření ovlivněny substrátem a neudávají vlastní tvrdost povlakového systému, pro vzájemné porovnání povlaků je ale toto zatížení dostačující.

Měřený vzorek se položil na stolek měřidla. Po provedení vtisku a odlehčení zkušebního zatížení se v okuláru přístroje vyhledal vtisk a byly změřeny obě jeho úhlopříčky podle rysek v okuláru. Nejdelší ryska se nastavila potočením okuláru a ovládacími prvky do polohy, ve které procházela dvěma protilehlými vrcholy vtisku. Zbylé dvě pohyblivé rysky, které jsou na první rysku kolmé, se nastavily tak, aby každá z nich procházela jedním vrcholem. Délka úhlopříčky byla vyhodnocena elektronicky a po zopakování postupu na druhé úhlopříčce se určil aritmetický průměr délek.



Obr.4.6 Schéma nastavení rysek okuláru tvrdoměru

4.4.2 Výsledky měření

Tab.4.6 Naměřené hodnoty úhlopříček a výsledná tvrdost

vzorek	měření	d [μm]	průměrné d [μm]	HV 30
č. 1	1.	142,9	146,2	2600
	2.	147,6		
	3.	148,2		
č. 2	1.	138,0	138,3	2908
	2.	138,9		
	3.	137,9		
č. 3	1.	135,9	134,2	3087
	2.	134,1		
	3.	132,6		

4.5 Adheze

4.5.1 Popis zkoušky

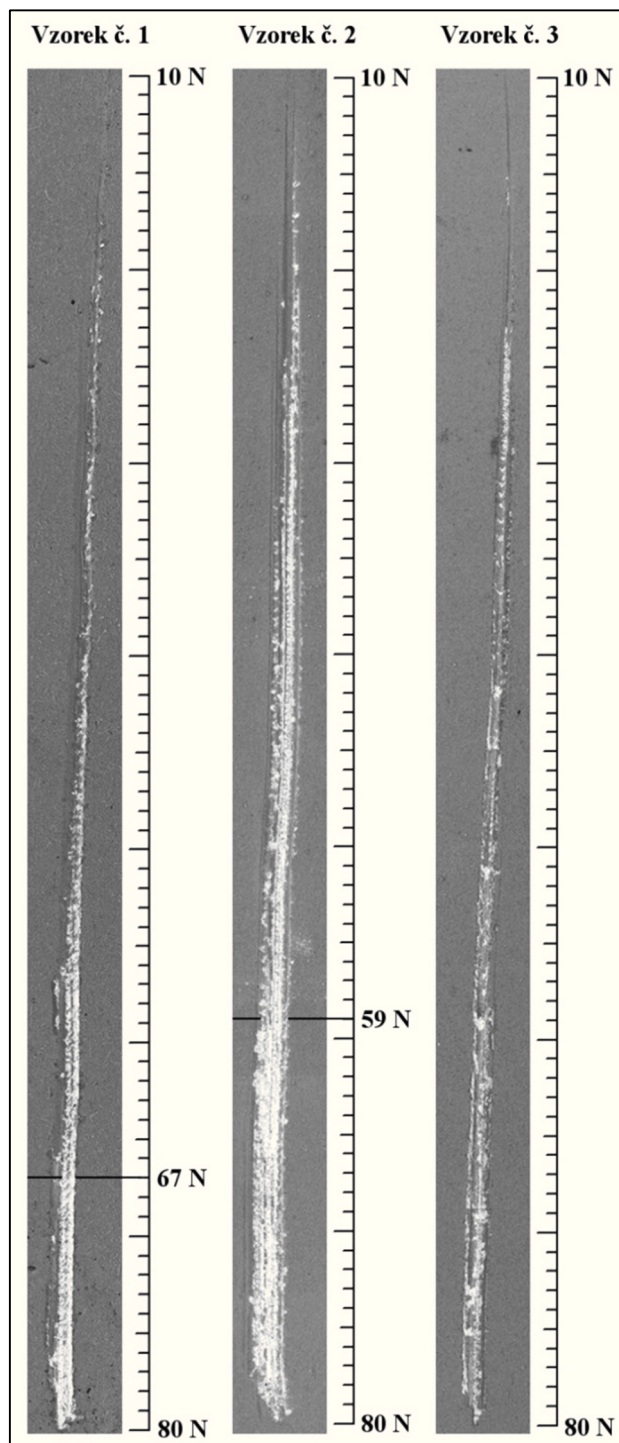
Scratch test byl proveden na scratch testeru firmy MEZ Náchod. Vzorky se zatěžovaly lineárně rostoucí silou od 10 do 80 N. Jako kritérium pro porovnání povlaků byla zvolena kritická síla při počátku pravidelného odlupování povlaku v celé šířce stopy vrypu. Snímky vrypů použité pro vyhodnocení zkoušky (viz obrázek č. 4.7) byly foceny na SEM po částech tak, aby se jednotlivé části překrývaly, a následně byly spojeny do jednoho snímku v programu GIMP.

4.5.2 Výsledky zkoušky

Vzorek č. 1 – k pravidelnému odtržení v celé šířce vrypu začalo docházet při 67 N.

Vzorek č. 2 – kritické zatížení u tohoto povlaku bylo nejmenší, 59 N.

Vzorek č. 3 – při scratch-testu nedošlo k odloupenutí v celé šířce vrypu.



Obr.4.7 Vrypy

4.6 Zkouška šíření teplotních trhlin

4.6.1 Řezné podmínky

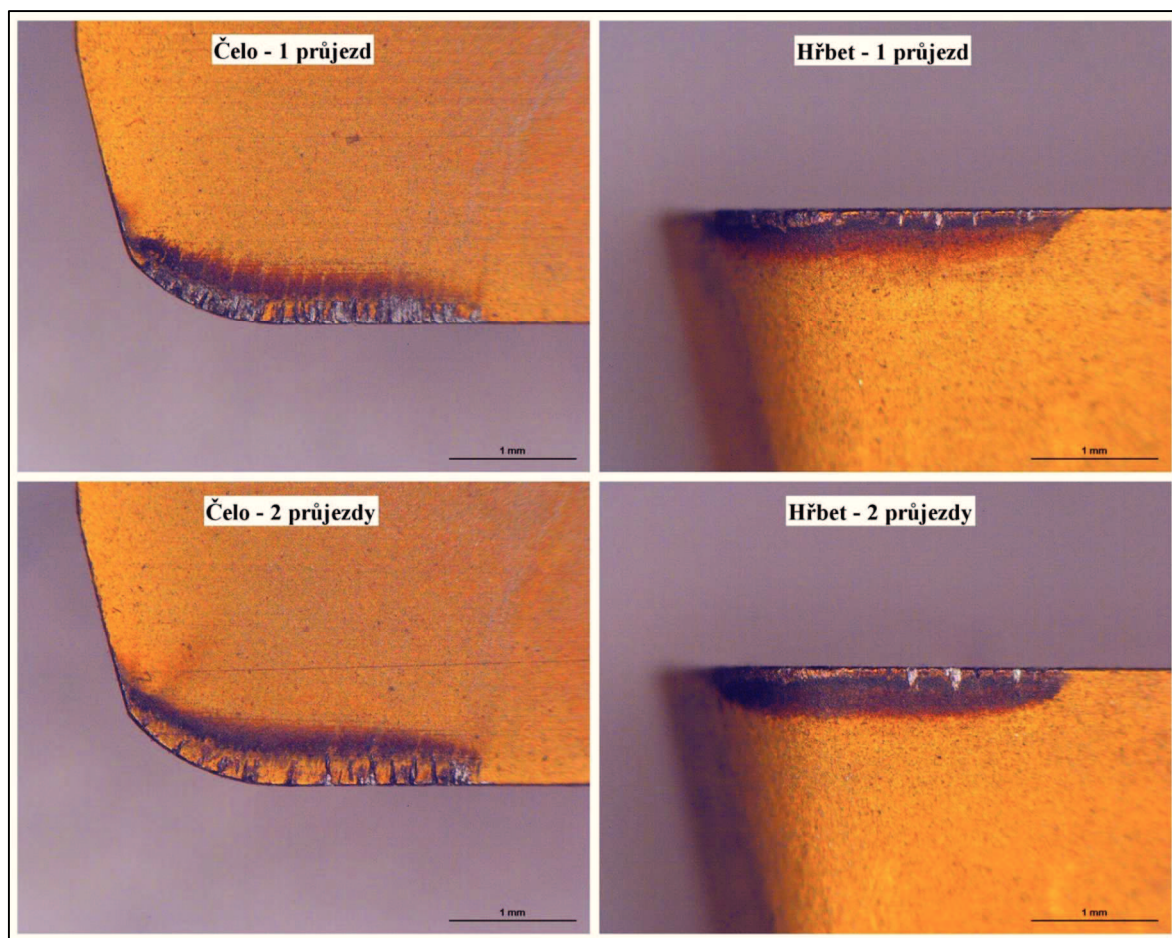
V průběhu zkoušky byly použity dvě řezné hrany vyměnitelné břitové destičky. Na první řezné hraně byl proveden jeden průjezd a na druhé průjezdy dva.

Tab.4.7 Řezné podmínky zkoušky šíření teplotních trhlin

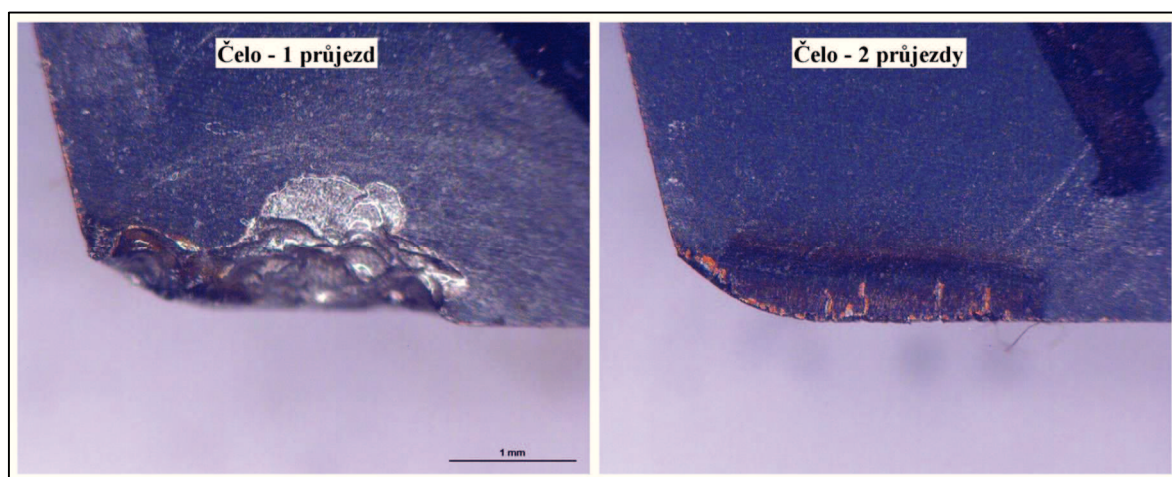
Stroj	vertikální obráběcí centrum MCV 1270 značky MAS		
Materiál	12050.1		
	tvrdost materiálu	180-190 HB	
	skupina	P	
Chlazení	řezná kapalina směřována na výstup destičky z materiálu		
Operace	nesousledné rovinné frézování		
χ_r	70°	v_c	420 m/min
z	1	f_z	0,1 mm/z
n	1319 ot/min	a_p	2,5 mm
1 průjezd	počet rázů na 1 zub		3300
	čistý čas obrábění		2,5 min
2 průjezdy	počet rázů na 1 zub		6600
	čistý čas obrábění		5 min

Z důvodu potřeby většího tepelného šoku VBD a rychlejšího šíření teplotní trhlin byly řezné podmínky zvoleny záměrně náročné a s chlazením řeznou kapalinou.

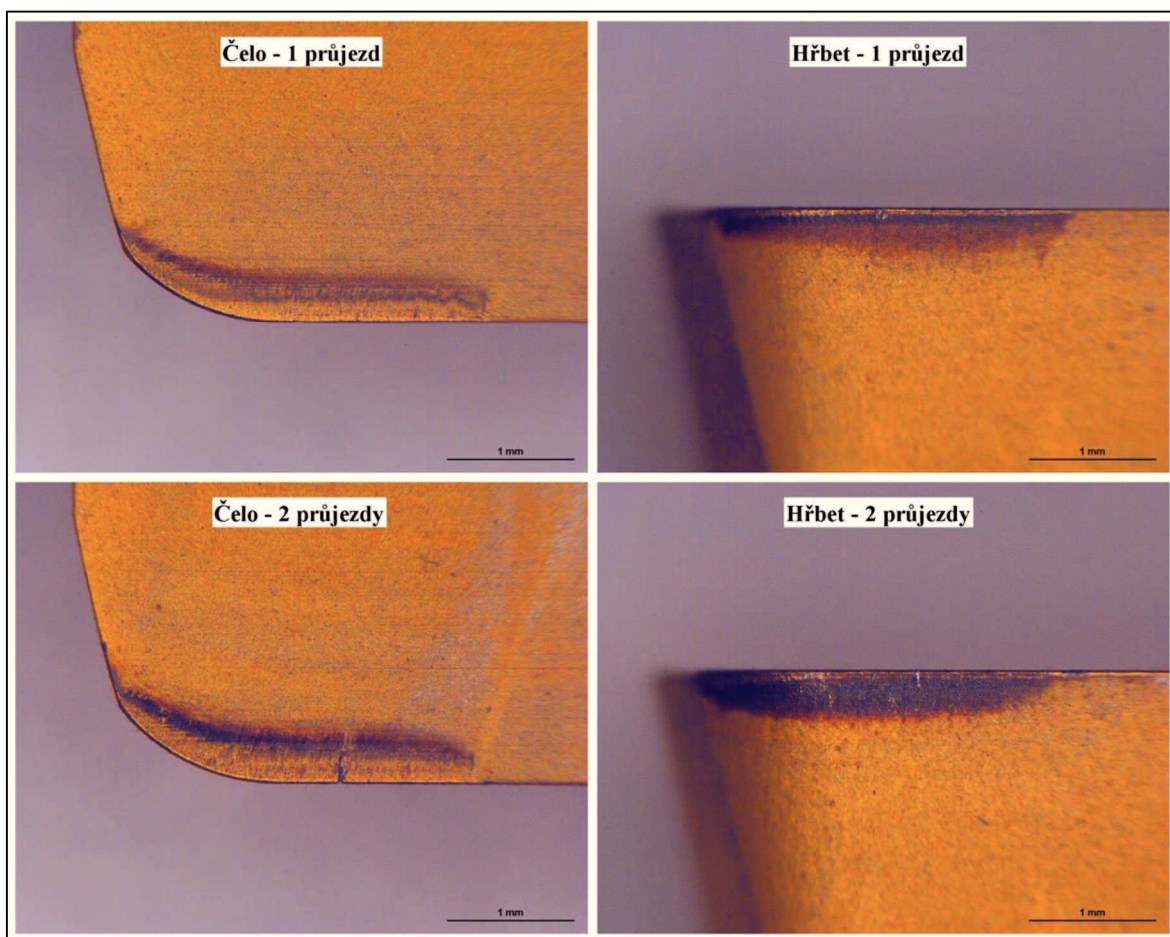
4.6.2 Snímky teplotních trhlin



Obr.4.8 Snímky teplotních trhlin na vzorku č. 1



Obr.4.9 Snímky teplotních trhlin na vzorku č. 2



Obr.4.10 Snímky teplotních trhlin na vzorku č. 3

U vzorků č. 1 a 2 je opotřebení po jednom průjezdu větší, než po dvou průjezdech. U vzorku č. 2 dokonce došlo k náhlému lomu bříty. To je zapříčiněno odchylkami v procesu výroby (substrátu i povlaku) a zkoušce.

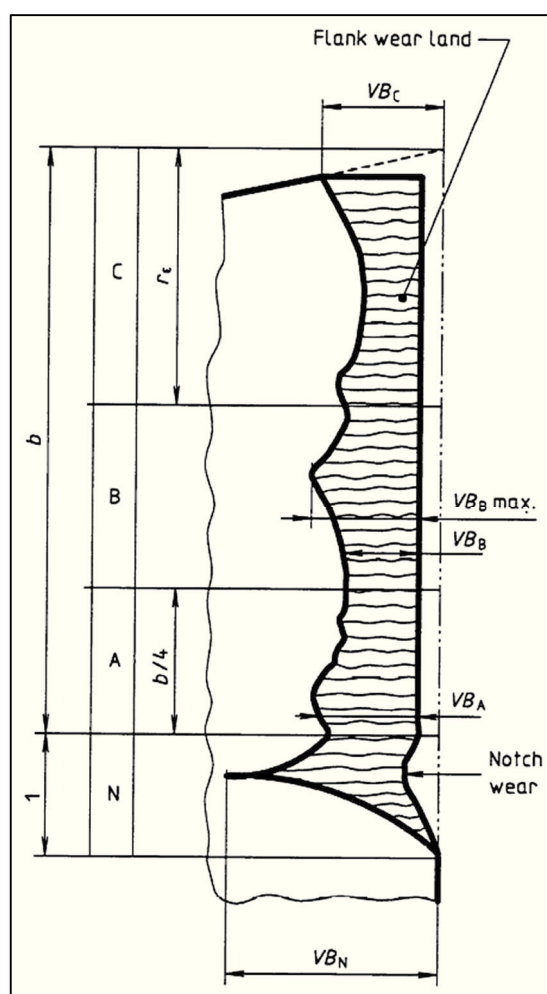
4.7 Dlouhodobá zkouška trvanlivosti

4.7.1 Podmínky zkoušky

Tab.4.8 Podmínky dlouhodobé zkoušky trvanlivosti

Stroj		stolová frézka FCV 63		
Materiál		12050.9; C45		
		tvrdost materiálu		200 HB
		skupina		P
Řezné podmínky	Řez. rychlost v_c	260 m/min	Hloubka řezu a_p	2 mm
	Otáčky n	662 ot/min	Šířka fréz. plochy a_e	100 mm
	Posuv na zub f_z	0,2 mm/z	Počet záběrů i	1x
	Počet zubů z	1	Délka záběru l	800 mm
	Posuv f_{min}	132 mm/min	Čas jednoho záběru	6 min
	Povrchová kůra	ne	Chladicí kapalina	ne
	Přerušovaný řez	ne	Tuhost soustavy Stroj-Nástroj-Obrobek	1

4.7.2 Naměřené hodnoty opotřebení

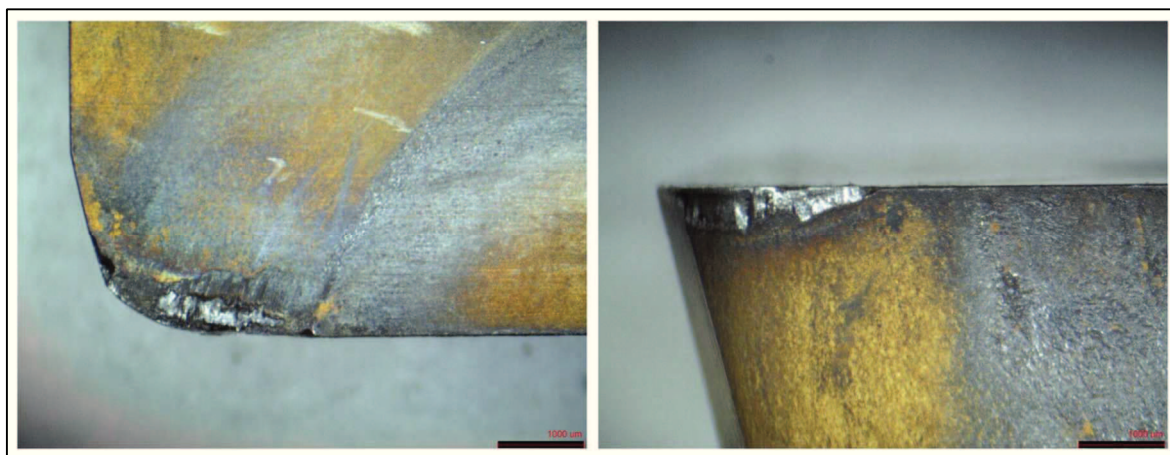


Obr.4.11 Typy a oblasti opotřebení nástrojů na hřbetě [34]

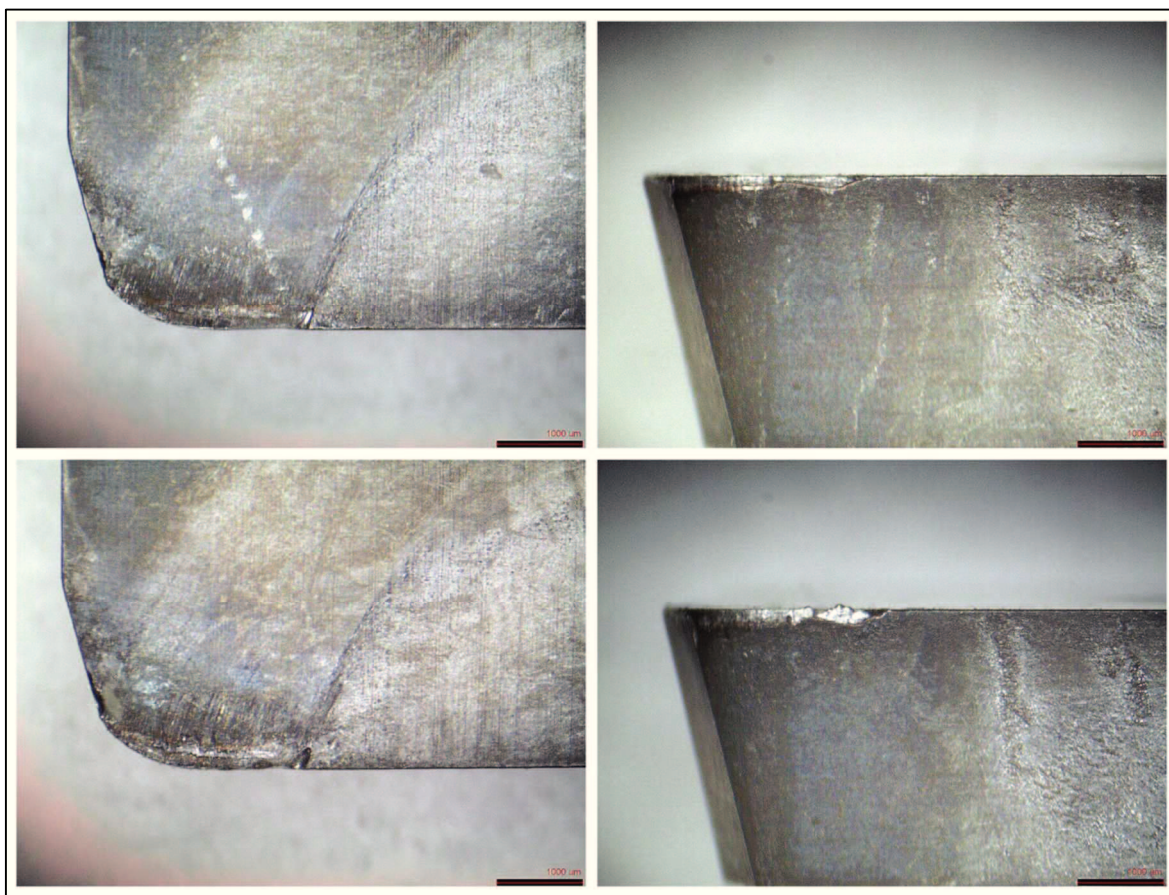
- VB_B – opotřebení na boku
- VB_C – opotřebení na rohu
- VB_N – velikost vrubu na boku (ve vzdálenosti a_p od špičky nástroje)
- VB_2 – opotřebení na rohu vedlejšího ostří

Tab.4.9 Naměřené hodnoty velikosti opotřebení v čase

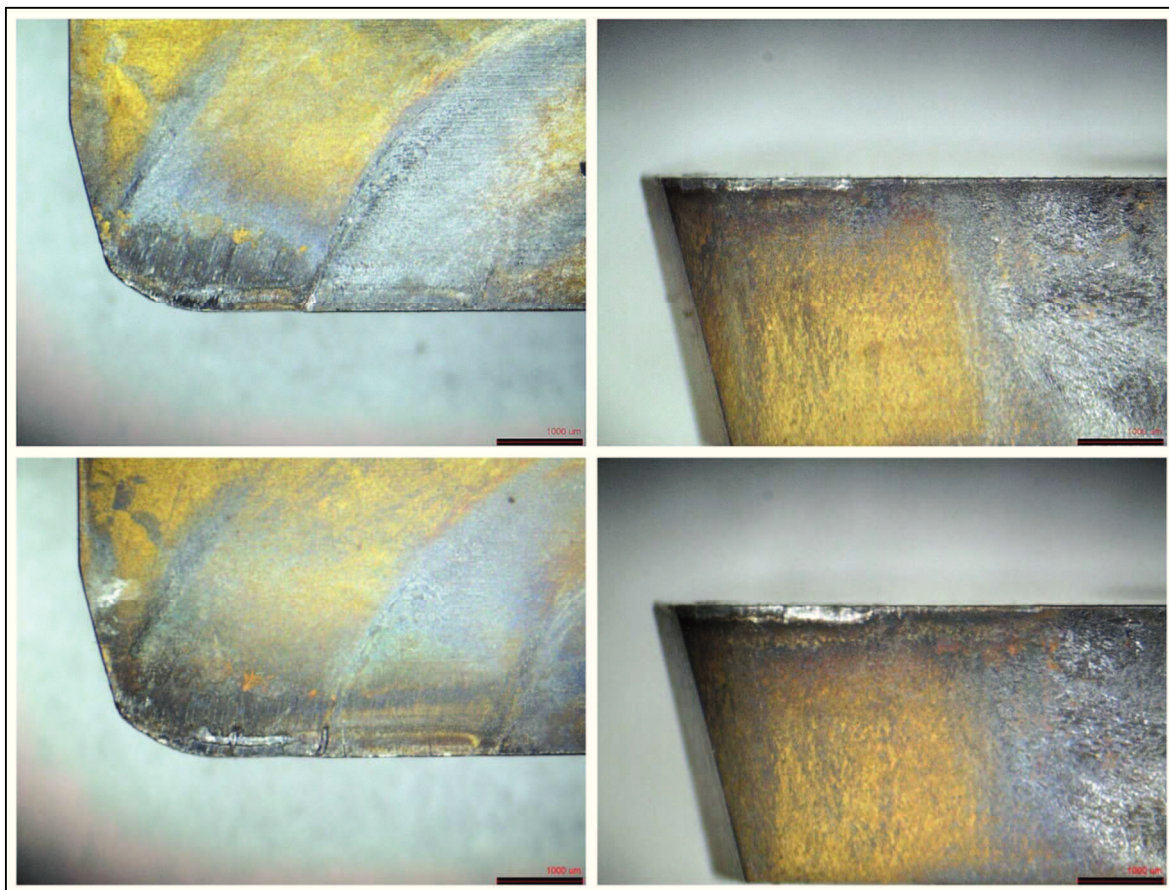
Kritéria opotřebení			$VB_B=0,2; VB_C=0,4$						
Vzorek	Zkouška	Kritérium	Časové rozvržení [min]						
			12	24	36	48	60	72	78
č. 1	1	VB_B [mm]	0,068	0,116	0,136	0,192	0,457		
		VB_C [mm]	0,064	0,075	0,076	0,126	0,156		
	2	VB_B [mm]	0,070	0,120	0,143	0,188	0,335		
		VB_C [mm]	0,066	0,078	0,090	0,159	0,227		
č. 2	1	VB_B [mm]	0,066	0,114	0,129	0,155	0,175	0,200	
		VB_C [mm]	0,063	0,070	0,088	0,120	0,147	0,158	
	2	VB_B [mm]	0,071	0,112	0,130	0,160	0,180	0,254	
		VB_C [mm]	0,065	0,070	0,090	0,124	0,142	0,166	
č. 3	1	VB_B [mm]	0,073	0,112	0,138	0,151	0,165	0,192	0,205
		VB_C [mm]	0,060	0,068	0,094	0,126	0,142	0,154	0,160
	2	VB_B [mm]	0,069	0,108	0,132	0,149	0,173	0,197	0,219
		VB_C [mm]	0,064	0,064	0,095	0,125	0,145	0,159	0,170



Obr.4.12 Opotřebení vzorku č. 1 po 60 minutách



Obr.4.13 Opotřebení vzorku č. 2 po 60 minutách (nahore) a po 72 minutách (dole)



Obr.4.14 Opotřebení vzorku č. 3 po 60 minutách (nahore) a po 78 minutách (dole)

4.7.3 Trvanlivost a řezivost

Tab.4.10 Výsledné hodnoty trvanlivosti a řezivosti

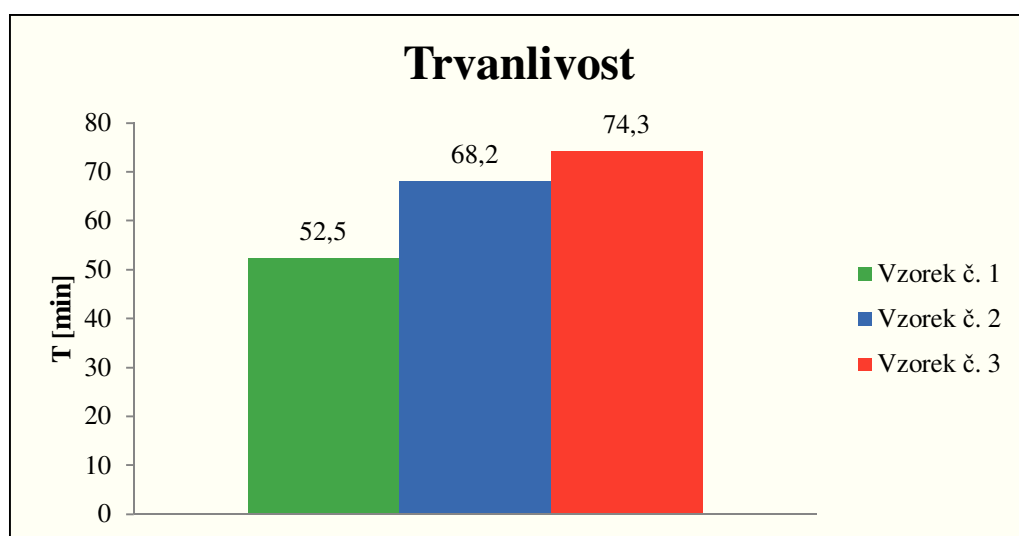
Vzorek	Zkouška	Trvanlivost [min]	Průměrná trvanlivost [min]	Řezivost	Rozptyl
č. 1	1	51,0	52,5	71%	2,9 %
	2	54,0			
č. 2	1	72,0	68,2	92%	5,6 %
	2	64,4			
č. 3	1	75,7	74,3	100 %	2,0 %
	2	72,8			

Výsledné hodnoty trvanlivosti každého vzorku byly určeny z lineární závislosti opotřebení na čase mezi posledními dvěma měřenými hodnotami, viz tabulka č. 4.9 v předcházející podkapitole.

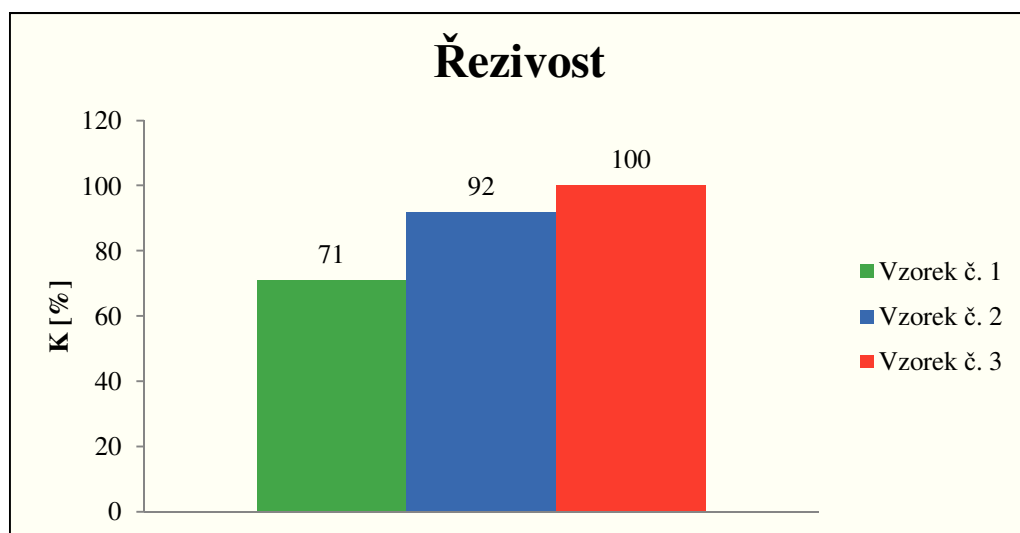
Zkoušky se vždy dělají se dvěma destičkami z důvodu možných odchylek ve zkoušce, výrobě či obráběném materiálu. Rozptyl slouží ke zjištění opakovatelnosti metody s daným vzorkem. Počítá se podle následujícího vzorce.

$$\text{Rozptyl} = \frac{\frac{|T_1 - T_2|}{2}}{\frac{(T_1 + T_2)}{2}} \cdot 100 [\%]$$

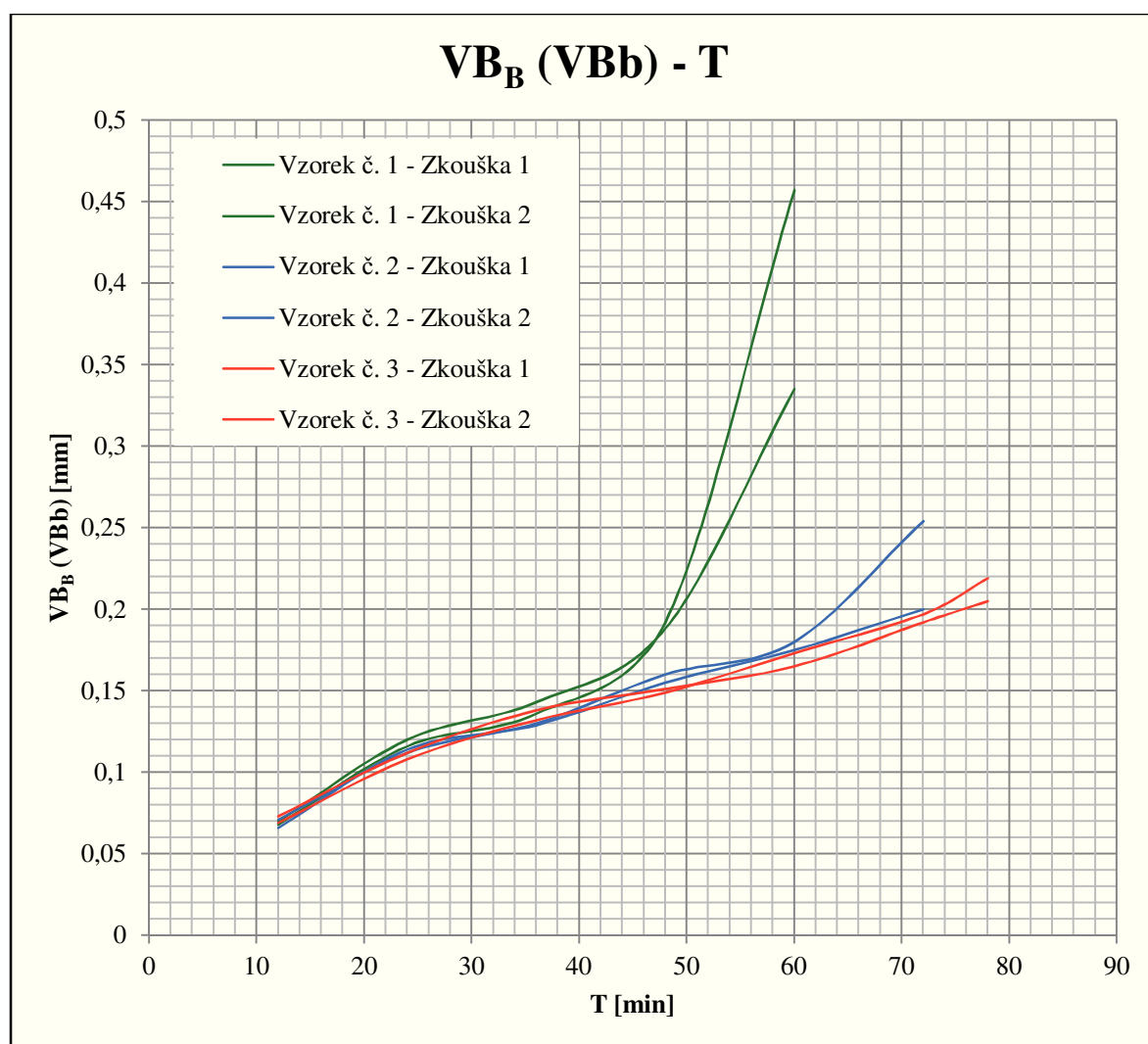
- T_1 – trvanlivost první zkoušky
- T_2 – trvanlivost druhé zkoušky



Obr.4.15 Grafické porovnání trvanlivosti jednotlivých vzorků



Obr.4.16 Grafické porovnání řezivosti jednotlivých vzorků



Obr.4.17 Graf závislosti opotřebení VB_B na čase

5 Závěr

Na základě provedených měření a testů se dospělo k následujícím závěrům:

Vyhodnocení tloušťky a rovnoměrnosti povlaků

Celkově nejsilnější povlak na krajích i uprostřed má vzorek č. 3 a nejslabší vzorek č. 1. Průměrné hodnoty tloušťky povlaků na krajích i středech dosedacích ploch všech vzorků se od průměrných hodnot na čelech liší maximálně o 0,1 μm . Poměr tloušťky povlaku n krajích k tloušťce povlaku uprostřed čela i dosedací plochy je nejmenší na vzorku č. 2, má tedy nejrovnoměrnější povlak. Druhý nejrovnoměrnější povlak má vzorek č. 3. Dle výsledků měření byla tloušťka a rovnoměrnost vrstev všech tří vzorků shledána vyhovující v rámci limitů firem Pramet Tools, s.r.o a SHM, s.r.o.

Vyhodnocení měření tvrdosti

Nejvyšší tvrdost má vzorek č. 3 (3087 HV), druhou nejvyšší vzorek č. 2 (2908 HV) a nejmenší vzorek č. 1 (2600 HV). Vzorky č. 3 a 2 mají povlak tvořený z nanovrstev, což v porovnání se vzorkem č. 1 majícím monovrstevný povlak tvrdost podstatně zvýšilo. Tyto dvě nanovrstvy se od sebe liší poměrem obsahu Al a Ti, přičemž dle [44] rostoucí podíl Al ve vrstvách AlTiN tvrdost zvyšuje až do vzájemného poměru 40/60% (Ti/Al). S dalším nárůstem obsahu Al tvrdost klesá. Výsledky měření tomu odpovídají, vzorek č. 3 s větším zastoupením hliníku v nanovrstvě ve vzájemném poměru 44,1/55,9% (Ti/Al) má ve srovnání se vzorkem č. 2 s poměrem prvků 54,5/45,5% (Ti/Al) větší tvrdost.

Výsledky měření byly z důvodu velkého zkušebního zatížení (294 N) ovlivněny také jiným faktorem – tloušťkou povlaku. Rozdíly mezi tloušťkami povlaků ovšem nejsou tak velké, aby toto ovlivnění měkčím substrátem (1310 HV) bylo rozhodující.

Vyhodnocení scratch-testu

Podle snímků vrypů viz obrázky č. 4.7 je patrné, že nejhorší adhezi má vzorek č. 2 postrádající povrchovou vrstvu TiN. U tohoto vzorku byla stanovena kritická síla na 59 N. TiN se dle [45] vyznačuje velmi dobrou adhezí a také nízkým koeficientem tření, který ovlivňuje napětí způsobené tangenciální třecí silou. Oba vzorky s touto povrchovou vrstvou dopadly v testu lépe. Na vzorku č. 1 došlo k odloupenutí povlaku při kritické síle 67 N. Nejlepšího výsledku při scratch-testu však bylo dosaženo u vzorku č. 3, u kterého

nedošlo ani při nejvyšší zátěži 80 N k odloupení povlaku v celé šířce. Tento povlak se od povlaku vzorku č. 1 liší houževnatější nanovrstevnou strukturou, která odklání a zpomaluje šíření trhlin.

Vyhodnocení zkoušky šíření teplotních trhlin

Na vzorku č. 1 vzniklo po dvou průjezdech nástroje několikanásobně více teplotních trhlin v porovnání s ostatními vzorky. V místě několika trhlin došlo k vydrolení řezné hrany. Vzorek č. 2 odolával dynamickému tepelnému zatížení lépe, než vzorek č. 1, počet teplotních trhlin je podstatně menší, ovšem na řezné hraně docházelo k většímu vydrolování částic. Nejlepšího výsledku bylo dosaženo se vzorkem č. 3, na kterém se po dvou průjezdech nástroje vytvořila pouze jedna teplotní trhlina. Jeho celkové opotřebení bylo výrazně nižší a nedocházelo k vydrolování řezné hrany.

Tyto výsledky ukazují, že oba vzorky s povlaky z nanovrstev díky jejich schopnosti odklánět a zpomalovat trhliny vykazují ve srovnání s povlakem monovrstevným vyšší odolnost proti šíření teplotních trhlin. Z obou vzorků s nanovrstvami je za daných řezných parametrů při obrábění přerušovaným řezem odolnější proti šíření teplotních trhlin vzorek č. 3 s povrchovou vrstvou TiN a silnější nanovrstvou obsahující více hliníku, než titanu.

Vyhodnocení dlouhodobé zkoušky trvanlivosti

V průběhu dlouhodobé zkoušky trvanlivosti vykazovaly oba vzorky s povlakem č. 1 zprvu podobný trend vývoje opotřebení, jako ostatní vzorky, ovšem jak lze pozorovat z průběhu grafu na obrázku č. 4.17, v čase okolo 40. minuty začalo docházet k rapidnímu nárůstu opotřebení na hřbetě a průměrná doba trvanlivosti vzorků s tímto povlakem je 52,5 min. Hlavními důvody kratší trvanlivosti ve srovnání s ostatními povlaky jsou nejmenší celková tloušťka a monovrstevná struktura povlaku.

Nanovrstevné povlaky jsou houževnatější než monovrstvy, a proto při dlouhodobé zkoušce frézováním, kde je nástroj zatěžován dynamicky, s nimi bylo dosaženo značně lepších výsledků. K dramatičtějšímu nárůstu opotřebení před koncem trvanlivosti jako u povlaku č. 1 došlo pouze u jednoho vzorku s povlakem č. 2, což může být dáno odchylkami při zkouškách či výrobě. Vzorky č. 1 s průměrnou dobou trvanlivosti 68,2 min se řadí za vzorky s povlakem č. 3, které v průměru dosáhly trvanlivosti až 74,3 min.

Jedním z rozhodujících faktorů je adheze, kterou má povlak č. 2 nejhorší ze zkoušených povlaků.

Jako kritérium hodnocení trvanlivosti bylo zvoleno opotřebení na hřbetě VBD, kde z mechanismů opotřebení převládá abraze, při které je velmi důležitá tvrdost materiálu nástroje. Povrchová vrstva povlaku č. 2 je tvořena materiálem AlTiN, který má vyšší tvrdost než TiN. Tvrdost jeho nanovrstvy TiAlN je v důsledku menšího zastoupení hliníku ve struktuře nižší, než tvrdost nanovrstvy povlaku č. 3, v níž jsou Ti a Al zastoupeny ve vzájemném poměru 44,1/55,9% (Ti/Al). Nejvyšší trvanlivost ze zkoušených vzorků vykazoval právě povlak č. 3. Výsledek byl také ovlivněn tloušťkami celého povlaku i samotné nanovrstvy, které má povlak č. 3 největší.

6 Seznam použité literatury

1. HUMÁR, Anton. *Matriály pro řezné nástroje*. Praha : MM publishing, s.r.o., 2008. ISBN 978-80-254-2250-2.
2. Sandvik Coromant. *Příručka obrábění*. Sandviken : Scientia, 1997. ISBN 91-97 22 99-4-6.
3. MRKVICA, Ivan. *Návody ke cvičení z obráběcích nástrojů 1. část*. Ostrava : VŠB - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA, 2008. ISBN 978-80-248-1053-9.
4. ŠÍMA, Michal, JÍLEK, Mojmír a HOLUBÁŘ, Pavel. *PVD povlaky na bázi oxidu Al_2O_3* . [Online] 2012. [Citace: 21. 1. 2013] <<http://www.mmspektrum.com/clanek/pvd-povlaky-na-bazi-oxidu-al2o3.html>>.
5. *Současnost a trendy povlakování technologií PVD*. [Online] 2003. [Citace: 2. 1. 2013] <<http://www.mmspektrum.com/clanek/soucasnost-a-trendy-povlakovani-technologie-pvd.html>>.
6. Platit AG, SHM, s. r. o. *Počítačová simulace růstu PVD povlaků a nová řada trojvrstvých povlaků*. [Online] 2008. [Citace: 2. 1. 2013] <<http://www.mmspektrum.com/clanek/pocitacova-simulace-rustu-pvd-povlaku-a-nova-rada-trojvrstvy-ch-povlaku.html>>.
7. HOLUBÁŘ, Pavel, ŠÍMA, Michal a ZINDULKA, Ondřej. *Technologie úprav nástrojů před a po povlakování*. [Online] 2005. [Citace: 2. 1. 2013] <<http://www.mmspektrum.com/clanek/technologie-uprav-nastroju-pred-a-po-povlakovani.html>>.
8. ŠÍMA, Michal a ZINDULKA, Ondřej. *Měření vlastností povlaků*. [Online] 2004. [Citace: 3. 1. 2013] <<http://www.shm-cz.cz/files/literatura/29.pdf>>.
9. HOLUBÁŘ, Pavel, JÍLEK, Mojmír a RŮŽIČKA, Milan. *Moderní PVD povlaky pro řezné aplikace a tvárění*. [Online] 2004. [Citace: 3. 1. 2013] <<http://www.shm-cz.cz/files/literatura/30.pdf>>.
10. ZINDULKA, Ondřej. *Moderní metody povlakování nástrojů*. [Online] 2004. [Citace: 3. 1. 2013] <<http://www.shm-cz.cz/files/literatura/31.pdf>>.
11. HOLUBÁŘ, Pavel. *APLIKACE TRIPLECOATING NA VBD*. [Online] 2009. [Citace: 3. 1. 2013] <<http://www.shm-cz.cz/files/literatura/52.pdf>>.
12. Advanced Coating Technologies, Inc. *Types of Coatings*. [Online] 2011. [Citace: 21. 1. 2013] <<http://www.actechnol.com/types-of-coatings/>>.
13. *TiN coating*. [Online] 2013. [Citace: 21. 1. 2013] <<http://www.pvd-coatings.co.uk/coatings/ceramic-coatings/tin-coating/>>.
14. *TiAlN coating*. [Online] 2013. [Citace: 21. 1. 2013] <<http://www.pvd-coatings.co.uk/coatings/ceramic-coatings/tialn-coating/>>.
15. *TiCN coating*. [Online] 2013. [Citace: 21. 1. 2013] <<http://www.pvd-coatings.co.uk/coatings/ceramic-coatings/ticn-coating/>>.
16. BryCoat, Inc. *BryCoat PVD Coating Solutions*. [Online] [Citace: 21. 1. 2013] <<http://www.brycoat.com/coating-services/pvd-coatings.html>>.
17. ZPS - FRÉZOVACÍ NÁSTROJE a.s. *Typy povlaků*. [Online] [Citace: 23. 1. 2013] <<http://www.zps-fn.cz/html/typy-povlaku-24.html>>.

18. Southern PVD Co. *Tool Coating*. [Online] 2006. [Citace: 21. 1. 2013] <<http://www.southern-pvd.com/toolcoating.htm>>.
19. PLATIT AG. *Coatings structures*. [Online] 2012. [Citace: 23. 1. 2013] <<http://platit.com/coatings-structures>>.
20. SHM, s.r.o. *Charakteristika povlaku*. [Online] [Citace: 26. 1. 2013] <<http://www.shm-cz.cz/pl/technicke-informace/charakteristika-povlaku>>.
21. *Armor for Cutting Tools*. [Online] [Citace: 26. 1. 2013] <<http://customcarbide.com/process-solutions/armor-for-tools/>>.
22. SHM, s.r.o. *PVD Technology*. [Online] [Citace: 26. 1. 2013] <<http://www.shm-cz.cz/pl/technical-information/pvd-technology-shm>>.
23. CSELLE, T. *TripleCoatings3® – New Generation of PVD-Coatings for Cutting Tools*. [Online] 2008. [Citace: 27. 1. 2013] <<http://ebookbrowse.com/machine-manufacturing-triple-coating-jan-2009-pdf-d336492098>>.
24. *Světelná mikroskopie*. [Online] 2012. [Citace: 2. 2. 2013] <<http://web.natur.cuni.cz/~parazit/parpages/mikroskopickatechnika/>>.
25. VOJTKULÁKOVÁ, Z. *Převrácený mikroskop*. [Online] [Citace: 2. 2. 2013] <http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/opory/sm/Druhy_mikroskop_kap2.html>.
26. NEBESÁŘOVÁ, A. *Skanovací elektronový mikroskop*. [Online] 2001. [Citace: 2. 2. 2013] <<http://www.paru.cas.cz/lem/book/Podkap/7.0.html>>.
27. *Elektronová mikroskopie*. [Online] 2011. [Citace: 2. 2. 2013] <<http://vyuka.zmoravec.net/download/elektrona-mikroskopie.pdf>>.
28. *EDX Analysis and WDX Analysis*. [Online] 2004. [Citace: 3. 2. 2013] <<http://www.siliconfareast.com/edxwdx.htm>>.
29. *Není povrch jako povrch – EDS, WDS a EBSD*. [Online] 2011. [Citace: 3. 2. 2013] <<http://www.chempoint.cz/neni-povrch-jako-povrch>>.
30. *Microhardness Test*. [Online] 2011. [Citace: 4. 2. 2013] <<http://www.gordonengland.co.uk/hardness/microhardness.htm>>.
31. *Scratch tester*. [Online] 2013. [Citace: 4. 2. 2013] <<http://www.pvd-coatings.co.uk/pvd-coating-technology/testing-equipment/scratch-tester/>>.
32. *The Backscatter Electron (BSE) Detector*. [Online] 2010. [Citace: 3. 2. 2013] <<http://www.geos.ed.ac.uk/facilities/sem/BSE.html>>.
33. Oddělení povrchového inženýrství - Západočeská univerzita v Plzni. *Zkoušky trvanlivosti ostrých řezných nástrojů*. [Online] 2010. [Citace: 29. 3. 2013] <<http://www.ateam.zcu.cz/trvanlivost.html>>.
34. International Organization for Standardization. *ISO 3685: Tool-life testing with single-point turning tools*. Geneve : 1993.
35. Pramet Tools, s.r.o. *Pramet Frézování 2012*. [Online] 2011. [Citace: 1. 4. 2013] <<http://www.pramet.com/download.php?id=438>>.

36. [Online] [Citace: 18. 4. 2013]
<http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta_Technologie_II_1dil.pdf>.
37. [Online] [Citace: 18. 4. 2013] <http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_05.pdf>.
38. PLATIT AG. *PLATIT π80*. [Online] 2013. [Citace: 25. 4. 2013] <<http://platit.com/coating-equipment/p80>>.
39. SHM, s.r.o. *Marwin G*. [Online] [Citace: 26. 1. 2013] <<http://www.shm-cz.cz/pl/products/pvd-coatings/marwin-g>>.
40. *Coating technologies by PVD - Challenges*. [Online] 2013. [Citace: 27. 1. 2013]
<http://www.surface-engineering-sudoe.com/en/technologies/coating_technologies_pvd_challenges.asp>.
41. *Scanning electron microscope*. [Online] 2013. [Citace: 2. 2. 2013]
<http://en.wikipedia.org/wiki/Scanning_electron_microscope#Detection_of_secondary_electrons>.
42. Metrotest s.r.o. *Zkoušky tvrdosti*. [Online] 2010. [Citace: 4. 2. 2013]
<http://www.metrotest.cz/files/zkousky_tvrlosti.pdf>.
43. Pramet Tools, s.r.o. *Pramet Soustružení 2012*. [Online] 2011. [Citace: 1. 4. 2013]
<<http://www.pramet.com/download.php?id=438>>.
44. PALDEY, S., DEEVI, S.C. *Single layer and multilayer wear resistant coatings of (Ti,Al)N: a review* [Online] 2002. [Citace: 1. 5. 2013] <<http://topaz.ethz.ch/function/web-hard/PDFs/PalDey-03.pdf>>.
45. HANNIBAL Carbide Tool, Inc. *Titanium Coatings TiN - TiCN - TiAlN - AlTiN*. [Online]. [Citace: 1. 5. 2013] <<http://www.hannibalcarbide.com/technical-support/titanium-coatings.php>>.

Poděkování

Tímto děkuji firmě Pramet Tools, s.r.o za to, že mi umožnili zabývat se tímto zajímavým tématem, konzultantce bakalářské práce paní Mgr. Evě Vítámvásové a vedoucímu práce panu doc. Dr. Ing. Ivanovi Mrkvicovi za jejich užitečné rady, důležité informace a trpělivost.

V neposlední řadě patří poděkování mé rodině za morální podporu, kterou mi poskytovali v průběhu celého mého studia.